

в конце параграфа, посвященного моим размышлениям о принципе инерции.

Однако в конечном счете указанные трудности имеют искусственный характер. Все, что необходимо, — это то, чтобы будущие показания наших инструментов определялись только теми показаниями, которые они нам дали или могли дать прежде. Но в этом отношении мы можем быть спокойны.

Глава VIII

ЭНЕРГИЯ И ТЕРМОДИНАМИКА

Энергетическая система. Трудности, возникшие в классической механике, побудили некоторые умы отдать предпочтение новой системе — так называемой *энергетике*. Энергетическая система получила свое начало вслед за открытием принципа сохранения энергии. Окончательная форма была ей дана Гельмгольцем.

Начнём с определения двух величин, которые играют фундаментальную роль в этой теории. Это следующие величины: во-первых, *кинетическая энергия*, или живая сила; во-вторых, *потенциальная энергия*.

Все перемены, какие могут происходить с телами природы, управляются двумя экспериментальными законами:

1) Сумма кинетической энергии и потенциальной энергии не меняется. Это — принцип сохранения энергии.

2) Если система тел в момент t_0 имеет конфигурацию A , а в момент t_1 — конфигурацию B , то переход от первой конфигурации ко второй всегда совершается таким путем, что *среднее* значение разности между двумя видами энергии за промежутки времени от t_0 до t_1 является величиной, самой малой из всех возможных. Это — принцип Гамильтона, представляющий одну из форм принципа наименьшего действия.

Энергетическая теория сравнительно с классической имеет следующие преимущества:

1) она является более полной, т. е. принцип сохранения энергии и принцип Гамильтона сообщают

нам больше, чем сообщали основные принципы классической теории; они исключают некоторые движения, которые не реализуются в природе, но совместимы с классической теорией;

2) она освобождает нас от атомистической гипотезы, которую было почти невозможно избежать в классической теории.

Но в свою очередь энергетическая система создает и новые трудности. Именно, определение двух видов энергии представляет почти столь же значительные трудности, как и определение силы и массы в первой системе. Однако избавиться от них легче, по крайней мере в наиболее простых случаях.

Представим себе изолированную систему, состоящую из некоторого числа материальных точек; пусть эти точки находятся под действием сил, зависящих только от их расстояний и относительного расположения, но не зависящих от их скоростей. В силу принципа сохранения энергии система должна иметь силовую функцию.

В этом простом случае выражение принципа сохранения энергии крайне просто. Некоторая доступная измерению величина должна оставаться постоянной. Эта величина представляет собой сумму двух членов; первый зависит только от положения материальных точек и не зависит от их скоростей; второй представляет собой линейную функцию квадратов скоростей. Такое разложение может быть сделано только одним способом. Первый член, который я обозначу через U , будет потенциальной энергией, второй, который я обозначу через T , будет кинетической энергией.

Конечно, если $T + U$ равняется постоянной величине, то это же самое будет иметь место для любой функции величины $T + U$, т. е. для

$$\varphi(T + U).$$

Но эта функция $\varphi(T + U)$ не будет суммой двух членов, из которых один был бы независим от скоростей, а другой зависел бы линейно от их квадратов. Между функциями, сохраняющими постоянную величину, есть только одна, обладающая таким свойством, а именно $T + U$ (или любая линейная функция $T + U$ — это не имеет значения, ибо такая линейная

функция всегда может быть приведена к виду $T + U$ путем преобразования масштаба и перемены начала). Это выражение мы и назовем энергией; первый член будет иметь значение кинетической энергии, второй — значение потенциальной энергии. Таким образом, определение обоих видов энергии может быть доведено до конца без всякой двусмысленности. Точно так же может быть дано определение масс. Кинетическая энергия, или живая сила, весьма просто выражается через массы материальных точек и через их скорости, соотнесенные к какой-нибудь одной из них. Эти относительные скорости доступны наблюдению, и если мы будем знать выражение кинетической энергии как функции относительных скоростей, то массы представятся коэффициентами этого выражения.

Итак, в этом простом случае определение основных понятий является делом легким. Но трудности опять возникают в более сложных случаях, как например, если силы зависят не только от расстояний, но и от скоростей. Вебер предполагает, что взаимодействие двух электрических частиц зависит не только от их расстояния, но также от их скорости и ускорения. Если бы материальные точки притягивались по тому же закону, U зависело бы от скоростей и могло бы содержать член, пропорциональный квадрату скорости. Но как в этом случае можно было бы среди членов, пропорциональных квадратам скоростей, отличить те, которые относятся к T , и те, которые относятся к U ? Как, следовательно, различить два вида энергии? Даже больше того, как определить самую энергию? Ведь теперь мы не имеем уже никаких оснований предпочесть $T + U$ какой-либо другой функции $T + U$, раз исчезло свойство, отличавшее $T + U$ и состоявшее в возможности разделения ее на два слагаемых специальной формы.

Однако это не все. Необходимо принять в расчет не только механическую энергию в собственном смысле, но также другие виды энергии: теплоту, химическую энергию, электрическую энергию и другие. Тогда принцип сохранения энергии примет вид

$$T + U + Q = \text{const},$$

где T означает воспринимаемую кинетическую энергию, U — потенциальную энергию положения, зависящую исключительно от расположения тел, Q — внутреннюю молекулярную энергию в тепловой, химической или электрической форме.

Все шло бы хорошо, если бы эти три члена можно было резко различить: если бы T было пропорционально квадратам скоростей, U не зависело ни от скоростей, ни от состояния тела, Q зависело не от скоростей и расположения тел, а исключительно от их внутреннего состояния. Тогда выражение энергии допускало бы только единственное разложение на три члена указанной формы. На самом деле это не так; рассмотрим наэлектризованные тела: электростатическая энергия, обусловленная их взаимодействием, будет, очевидно, зависеть от их заряда, т. е. от их состояния, но также и от их расположения. Если эти тела находятся в движении, то они будут действовать друг на друга электродинамически, и электродинамическая энергия будет зависеть не только от их состояния и их расположения, но и от их скоростей. Таким образом, у нас не оказывается никакого средства выделить три подразделения энергии, рассортировав члены так, чтобы каждый относился к T , U и Q в отдельности.

Если $T + U + Q$ есть постоянная величина, то постоянной будет и любая ее функция

$$\varphi(T + U + Q).$$

Если бы $T + U + Q$ имело вышеуказанную специальную форму, неопределенности не могло бы возникнуть; между всеми функциями $\varphi(T + U + Q)$, сохраняющими постоянную величину, нашлась бы только одна, имеющая этот частный вид, и она была бы тем, что мы условились называть энергией. Но это, по вышесказанному, не выполняется: между функциями, сохраняющими неизменную величину, нет таких, которые бы в точности подходили под нашу специальную форму, — следовательно, как найти между ними ту, которую следует именовать энергией? У нас нет никакой путеводной нити для этих поисков.

Поэтому нам остается выразить принцип сохранения энергии только таким образом: *есть нечто, сохраняющее неизменную величину*. Но в такой форме

он оказывается вне пределов досягаемости опыта и сводится к некоторого рода тавтологии, ибо ясно, что если мир управляется законами, то существуют некоторые величины, которые остаются постоянными. Подобно принципам Ньютона (и по тем же основаниям), принцип сохранения энергии, основанный на опыте, не может быть опровергнут этим последним.

Это исследование показывает, что с переходом от классической системы к системе энергетической осуществляется известный прогресс, но что в то же время этот прогресс недостаточен.

Еще более серьезным кажется мне другое возражение: принцип наименьшего действия приложим к обратимым процессам; но он оказывается совершенно недостаточным, коль скоро речь идет о необратимых процессах. Попытка Гельмгольца распространить его на эту область явлений не имела и не могла иметь успеха: здесь все еще принадлежит будущему.

Самая формулировка принципа наименьшего действия имеет в себе нечто, неприятно поражающее наш ум. При переходе от одной точки к другой материальная частица ¹⁾, не подверженная действию какой-либо силы, но подчиненная условию не сходить с некоторой поверхности, движется по геодезической линии, т. е. по кратчайшему пути. Эта частица как будто бы знает ту точку, куда ее желают привести, предвидит время, которое она затратит, следуя по тому или иному пути, и, наконец, выбирает путь наиболее подходящий. В такой формулировке принципа частица представлена нам как бы одушевленным существом, обладающим свободой воли. Ясно, что следовало бы заменить эту формулировку другой, более подходящей, в которой, выражаясь языком философа, конечные причины не становились бы явным образом на место причин действующих.

Термодинамика ²⁾). Значение двух основных принципов термодинамики для всех областей физики становится с каждым днем все более важным. Оставляя предложенные сорок лет назад претенциозные теории, насыщенные молекулярными гипотезами, мы

¹⁾ В подлиннике une molécule.— *Примеч. ред.*

²⁾ Следующие строки представляют собой частичное воспроизведение предисловия в моей книге «Термодинамика».

пытаемся ныне воздвигнуть все здание математической физики единственно на термодинамической основе.

Способны ли два принципа — Майера и Клаузиуса — сообщить этому зданию на известное время достаточную прочность? В этом никто не сомневается; но откуда мы получаем такую уверенность?

Один выдающийся физик говорил мне однажды по поводу закона погрешностей: «Все крепко верят в него: математики считают его результатом наблюдений, а наблюдатели — математической теоремой». В течение долгого времени можно было сказать то же самое относительно принципа сохранения энергии. Но в настоящее время всем уже известно, что он представляет собою экспериментальный факт.

Но в таком случае, что дает нам право приписывать самому принципу бóльшую общность и точность сравнительно с теми опытами, которые послужили для его доказательства? Это равносильно вопросу: законны ли делаемые на каждом шагу обобщения эмпирических данных? У меня не хватает смелости разбирать этот вопрос после того, как столько философов тщетно искали его решения. Достоверно одно: если бы мы не имели способности к обобщению, наука не могла бы существовать или, по крайней мере, свелась бы к простой описи, к установлению единичных фактов, — она не имела бы для нас никакой ценности, так как не могла бы удовлетворить наше стремление к порядку и гармонии и в то же время была бы неспособна делать предсказания. Обстоятельства, предшествовавшие известному факту, по всей вероятности, никогда более не повторятся в своей совокупности: поэтому первое обобщение необходимо уже просто для того, чтобы предвидеть, повторится ли этот факт после того, как произойдет самое незначительное изменение в этих обстоятельствах.

Но всякое положение можно обобщить бесчисленным множеством способов. Между всеми возможными обобщениями нам необходимо выбрать только одно, а именно, самое простое. Таким образом, мы вынуждены поступать так, как если бы простой закон при прочих равных условиях имел бóльшую вероятность сравнительно со сложным законом.

Полвека тому назад было общераспространенным убеждение, что природа любит простоту. С тех пор

мы имели от нее много опровержений. Ныне мы такой тенденции уже не приписываем природе и сохраняем от этой тенденции лишь то, что необходимо, чтобы наука не уклонялась со своего пути. Таким образом, формулируя общий, простой и точный закон на основании сравнительно малочисленных и не абсолютно точных опытов, мы лишь повинемся необходимости, которой не может избежать человеческий ум. Но здесь имеется и кое-что большее, и это объясняет, почему я так настойчив.

Никто не сомневается в том, что принципу Майера предстоит пережить все частные законы, из которых он был извлечен, подобно тому как закон Ньютона пережил законы Кеплера, послужившие его источником и являющиеся лишь приближенными, если принять в расчет возмущения. Спрашивается, почему же этот принцип занимает привилегированное положение среди всех физических законов?

Для этого имеется ряд оснований — не очень значительных. Прежде всего, полагают, что мы не можем его отвергнуть, даже сомневаться в его абсолютной строгости, без того чтобы не допустить возможности «вечного движения»; мы, разумеется, не боимся такой перспективы, но считаем, что осторожнее признать принцип Майера, чем его отрицать. Быть может, это и не вполне точно: невозможность «вечного движения» влечет за собой сохранение энергии лишь для обратимых явлений.

Величавая простота принципа Майера также способствует укреплению нашей веры в него. В законе, выведенном непосредственно из опыта, каков, например, закон Мариотта, подобная простота внушала бы нам скорее недоверие. Но здесь это не так. Здесь мы видим, как элементы, которые на первый взгляд кажутся лишенными взаимной связи, неожиданно упорядочиваются, образуя гармоническое целое; и мы отказываемся думать, чтобы эта непредвиденная гармония была следствием простого случая. Наше приобретение как будто делается тем дороже для нас, чем больших усилий оно нам стоило; мы как будто тем сильнее убеждаемся в том, что действительно исторгли у природы ее тайну, чем ревнивей она, казалось, скрывала эту тайну от нас.

Однако все это — не слишком веские доводы; чтобы возвести закон Майера в ранг абсолютного принципа, нужно было бы представить более глубокий разбор вопроса. Но пытаюсь выполнить это, мы видим, что этот абсолютный принцип нелегко даже сформулировать. В каждом частном случае мы ясно видим, что такое энергия, и можем определить ее — по крайней мере предварительно; но найти общее определение ее невозможно. Как только мы хотим выразить принцип во всей его общности и приложить его ко Вселенной, мы видим, что он, так сказать, испаряется и от него остается только следующее: *существует нечто, что остается постоянным.*

Но имеет ли это какой-нибудь смысл? По детерминистской гипотезе состояние Вселенной определяется чрезвычайно большим числом n параметров, которые я обозначу x_1, x_2, \dots, x_n . Если известны значения параметров для одного какого-нибудь момента, а также производные этих параметров по времени, то можно высчитать значения их для всякого другого момента, предшествующего или последующего. Другими словами, наши n параметров удовлетворяют n дифференциальным уравнениям первого порядка. Эти уравнения имеют $n - 1$ интегралов, не содержащих времени; таким образом, существует $n - 1$ функций от x_1, x_2, \dots, x_n , сохраняющих неизменную величину. Поэтому, говоря, что *существует нечто, что остается постоянным*, мы высказываем простую тавтологию. Трудно было бы даже сказать, которому из этих интегралов должно принадлежать название энергии.

Впрочем, принцип Майера понимается иначе, когда он прилагается к ограниченной системе. В этом случае принимают, что p из наших n параметров изменяются под влиянием самостоятельных причин, так что мы имеем всего $n - p$ уравнений (вообще линейных) между нашими n параметрами и их производными.

Для большей простоты предположим, что сумма работ внешних сил равна нулю, так же как и сумма рассеянных системой количеств тепла. В таком случае принцип получит следующее выражение: *существует такое сочетание этих $n - p$ уравнений, первый член которого является точным дифференциалом*; так как в силу наших $n - p$ соотношений этот дифферен-

циал равен нулю, то интеграл его равняется постоянной величине, и этот интеграл есть то, что называется энергией.

Но каким образом возможно, что некоторые из параметров обнаруживают изменения, независимые от остальных? Это имеет место лишь под воздействием внешних сил (хотя мы для простоты и предположили, что алгебраическая сумма работ этих сил равна нулю). В самом деле, если бы система была совершенно изолирована от всякого внешнего воздействия, то знания величин наших n параметров в данный момент было бы достаточно для определения состояния системы в любой последующий момент (предполагая, что мы по-прежнему держимся детерминистской гипотезы), т. е. мы опять встретили бы прежнюю трудность.

Если будущее состояние системы не вполне определяется ее настоящим состоянием, то это значит, что оно зависит еще от состояния тел, внешних по отношению к системе. Но в таком случае правдоподобно ли, чтобы между параметрами x , определяющими положение системы, существовали уравнения, не зависящие от состояния этих внешних тел? И если в некоторых случаях мы, по-видимому, можем их составить, то не является ли это лишь следствием нашего незнания, следствием того, что влияние этих тел слишком слабо, чтобы наш опыт мог его обнаружить?

Если система не рассматривается как вполне изолированная, то вероятно, что строго точное выражение ее внутренней энергии должно зависеть от состояния внешних тел. Кроме того, выше мы предположили, что сумма внешних работ равна нулю; если бы мы пожелали освободиться от этого несколько искусственного ограничения, формулировка принципа стала бы делом еще более трудным. Поэтому для формулировки принципа Майера в абсолютном смысле необходимо распространять его на всю Вселенную, а тогда перед нами встает та самая трудность, которой мы желали избежать. Говоря кратко и обычным языком, закон сохранения энергии может иметь только один смысл, а именно: существует некоторое свойство, присущее всем возможностям; но по детерминистской гипотезе существует лишь единственная возможность, а тогда закон теряет свой смысл.

Напротив, при допущении индетерминистской гипотезы он имел бы смысл и тогда, когда бы мы пожелали придать ему абсолютное значение: он представлялся бы ограничением, наложенным на свободу.

Но слово «свобода» напоминает мне, что я выхожу за пределы физико-математической области. Поэтому я останавливаюсь и от всего предыдущего обсуждения сохраняю только один вывод: закон Майера является формой достаточно гибкой, чтобы можно было вложить в нее почти все, что угодно. Я не хочу этим сказать, ни то, что он не соответствует никакой объективной реальности, ни то, что он сводится к простой тавтологии, так как в каждом частном случае он имеет совершенно ясный смысл, если только не пытаются возвести его до степени абсолютного принципа.

Самая гибкость его дает основание верить в его высокую жизнеспособность; а так как, с другой стороны, он не может исчезнуть иначе, как растворившись в гармонии высшего порядка, то мы с доверием можем опираться на него в наших работах, наперед зная, что наш труд не пропадет даром.

Почти все сказанное выше применимо к принципу Клаузиуса. Различие в том, что последнее выражается неравенством. Кто-нибудь мог бы сказать, что это — свойство всех физических законов, так как точность их всегда ограничена погрешностями наблюдения. Но законы эти имеют притязание быть по меньшей мере первым приближением, и есть надежда на постепенное замещение их другими, все более точными. Напротив, если принцип Клаузиуса сводится к неравенству, то причина этого лежит не в несовершенстве наших средств наблюдения, а в самой природе вопроса.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ИЗ ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЫ

Итак, принципы механики представляются нам в двух различных аспектах. С одной стороны, это — истины, обоснованные опытом, подтверждающиеся весьма приближенно для систем почти изолированных. С другой стороны, это — постулаты, которые прилагаются ко всей Вселенной и считаются строго достоверными.

Если эти постулаты обладают общностью и достоверностью, каких недостает экспериментальным истинам, из которых они извлекаются, то это оттого, что они в результате проведенного анализа сводятся к простому соглашению, которое мы имеем право сформулировать, будучи заранее уверены, что никакой опыт не станет с ним в противоречие. Однако это соглашение не абсолютно произвольно; оно не вытекает из нашей прихоти; мы принимаем его, потому что известные опыты доказали нам его удобство. Так объясняется и то, почему опыт был в состоянии создать принципы механики, и то, почему он не сможет их ниспровергнуть.

Проведем сравнение с геометрией. Основные положения геометрии, как, например, постулат Евклида, суть также не что иное, как соглашения, и было бы настолько же неразумно доискиваться, истинны ли они или ложны, как задавать вопрос, истинна или ложна метрическая система. Эти соглашения только удобны, и в этом нас убеждают известные опыты.

На первый взгляд аналогия является полной: роль опыта представляется в обоих случаях одной и той же. Кто-нибудь мог бы сказать: либо механика должна быть признаваема за науку экспериментальную, и тогда то же самое следует сказать про геометрию; либо, наоборот, геометрия является наукой дедуктивной, и тогда механика должна быть такой же.

Но подобное заключение было бы незаконно. Опыты, которые привели нас к принятию основных соглашений геометрии в качестве наиболее удобных, относятся к вещам, которые не имеют ничего общего с объектами изучения геометрии, они относятся к свойствам твердых тел, к прямолинейному распространению света. Это — опыты механические и оптические; их отнюдь нельзя рассматривать как опыты геометрические. А главное основание, по которому наша геометрия представляется нам удобной, — это то, что различные части нашего тела, наш глаз, наши члены обладают в точности свойствами твердых тел. В этом смысле нашими основоположными опытами являются прежде всего физиологические опыты, которые относятся не к пространству, составляющему

предмет изучения для геометра, но к нашему собственному телу, т. е. к орудию, которым мы должны пользоваться при этом изучении.

Напротив, основные соглашения механики и те опыты, которыми доказываются их удобство, относятся к одним и тем же или к аналогичным предметам. Эти условные и общие принципы являются естественным и прямым обобщением принципов экспериментальных и частных.

Пусть не говорят, что здесь я провожу искусственные границы между науками; что если я отделяю геометрию в собственном смысле от изучения твердых тел, то я мог бы точно так же воздвигнуть стену между экспериментальной механикой и конвенциональной механикой общих принципов. В самом деле, кто не заметит, что, разделяя эти две науки, я искажил бы и ту и другую, что изолированная конвенциональная механика представляла бы собой нечто малозначащее, никак не могущее сравниться с величественным зданием геометрической науки?

Понятно теперь, почему преподавание механики должно оставаться экспериментальным. Только при таком методе оно может сделать понятным генезис науки, а это необходимо для полного понимания самой науки. Кроме того, механику изучают, чтобы ее применять; это возможно только при условии, что она остается объективной. Но, как мы видели, принципы механики, выигрывая в общности и достоверности, теряют в своей объективности. При первом ознакомлении с принципами особенно уместно подходить к ним с их объективной стороны; это можно сделать, только двигаясь от частного к общему, но не наоборот.

Принципы — это соглашения и скрытые определения. Тем не менее они извлечены из экспериментальных законов; эти последние были, так сказать, возведены в ранг принципов, которым наш ум приписывает абсолютное значение.

Некоторые философы довели процесс обобщения до крайностей; по их мнению, принципы составляют всю науку, которая, таким образом, вся принимает характер условного знания. Это парадоксальное учение, называемое номинализмом, не выдерживает критики.

Каким образом закон может стать принципом? Он выражал соотношение между двумя реальными членами A и B . Но он не был строго верным, а лишь приближенным. Мы произвольно вводим промежуточный, более или менее фиктивный член C , и C в силу определения связано с A точным отношением, которое выражено в законе. Таким образом, наш закон разложился на абсолютный, строгий принцип, выражающий соотношение A и C , и на приближенный, подлежащий пересмотру экспериментальный закон, который выражает соотношение между C и B . Ясно, что как бы далеко ни простиралось это расчленение, такие законы всегда будут иметь место.

Мы вступаем теперь в область законов в собственном смысле.