

Б. Г.  
КУЗНЕЦОВ

ПРИНЦИПЫ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Б. Г. КУЗНЕЦОВ

ПРИНЦИПЫ  
КЛАССИЧЕСКОЙ  
ФИЗИКИ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

Б. Г. КУЗНЕЦОВ

ПРИНЦИПЫ  
КЛАССИЧЕСКОЙ  
ФИЗИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
АКАДЕМИИ НАУК СССР  
МОСКВА · 1958

## АННОТАЦИЯ

Книга представляет собой вторую часть трехтомной монографии о развитии научной картины мира в физике XVII—XX вв. (первая часть — «Развитие научной картины мира в физике XVII—XVIII вв.» и третья часть — «Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии» вышли в 1955 и 1957 гг.). Книга содержит исторический и логический анализ развития принципов относительности, наименьшего действия, сохранения энергии, необратимости и близкодействия в физике XIX в. в свете их последующего развития в неклассических физических теориях. Книга рассчитана на научных работников, преподавателей и студентов, а также на более широкие круги читателей, интересующихся принципиальными основами теоретической физики и знакомых с общими понятиями механики, термодинамики и электродинамики, а также с простейшими понятиями анализа и векторного исчисления.

*Ответственный редактор*

*Л. С. ПОЛАК*

---

## I. ВВЕДЕНИЕ

В каждый исторический период свидетели появления научной концепции, даже если они понимают ее ограниченность и приближенный характер, не могут с полной определенностью сказать, в чем же состоит указанная ограниченность. Обычно они не могут также с исчерпывающей точностью определить, какие новые обобщения исторически готовятся данной теорией. Поэтому современникам не дано выяснить историческое значение теории и исторические причины — возможности производственной и экспериментальной техники, особенности экономического, политического и культурного развития, — определяющие в данный момент степень приближения научной картины мира к действительности. Историческая оценка по большей части бывает ретроспективной. Но это не значит, что она является прерогативой следующего поколения. В наше время современники одной теории быстро становятся свидетелями возникновения другой, более общей и более точной концепции. Многие ныне здравствующие физики после появления общей теории относительности смогли понять историческую ценность, значение и границы специальной теории и увидеть в ней зерна достигнутого наконец обобщения принципа ковариантности на более широкую группу преобразований. Это же поколение в середине двадцатых годов с появлением квантовой механики смогло увидеть ограниченность боровской теории атома и вместе с тем те элементы полуклассической модели, которые при своем обобщении должны были перевернуть представление о микромире.

Сейчас попытки обобщения квантовой механики и электродинамики позволяют представить себе возможные

новые исторические оценки существующей теории. Разумеется, неоднозначность таких попыток сказывается в неуверенности исторических оценок.

С современных квантовых и релятивистских позиций (включая попытки обобщения релятивистской квантовой механики и электродинамики) классическая физика представляет собой исторически закономерную (и поныне необходимую в широкой области) аппроксимацию, содержащую глубокие противоречия, заставлявшие в свое время науку подниматься на новую ступень. Образ классической физики, движущейся, ищущей, не находящей ответов, подготавливающей новую революцию в науке, питающей идею безостановочного и безграничного пересмотра научных истин, гораздо ближе к исторической действительности, чем идиллия окончательных непротиворечивых решений, к которой тянется метафизическая мысль. Такой «неклассический» образ классической физики и рисует история науки, рассматривая теории XIX в. с современных позиций.

Современные концепции позволяют увидеть историческую ограниченность классической физики. Но историческая ограниченность не имеет ничего общего с иллюзорностью, и историзм в науке не совпадает с концепцией «истории заблуждений». Он противостоит такой концепции. История науки рассматривает процесс бесконечного последовательного приближения картины мира к ее неисчерпаемому оригиналу, и только с этой точки зрения видна необратимость научного прогресса. Теория относительности, квантовая механика и релятивистская квантовая физика последовательно показали, что постоянство массы, непрерывность движения частицы и, наконец, ее себестоимость представляют собой закономерные аппроксимации.

В связи с этим возникает множество собственно исторических вопросов: как основные постулаты классической картины мира вытекали из последовательного накопления экспериментальных данных; как связаны границы применимости этих постулатов с развитием производства; как повлияли классические аппроксимации на развитие науки, философии, общественной мысли, культуры в целом. Мы пройдем мимо большинства этих вопросов, ограничившись лишь одним, в сущности предварительным:

каковы основные принципы классической физики, ее рассматривать с современной точки зрения.

Основные теоретические обобщения в физике XX столетия — теория относительности, квантовая механика, релятивистская квантовая механика и квантовая электродинамика — последовательно видоизменяли все более общие и фундаментальные понятия классической физики.

Теория относительности посягнула на независимость пространства и времени, на неизменность массы и затем, в 1916 г., на различие между движением по инерции и ускорением в гравитационном поле. Специальная теория относительности низвела до ранга аппроксимации одно из существенных допущений классической физики. В последней механические инерциальные системы отсчета равноправны, но всем механическим инерциальным системам противостоит одна привилегированная всеобщая система мирового эфира, относительно которой тело движется с «истинной» скоростью. В 1905 г. выяснилось, что скорость относительно эфира — бессодержательное понятие, что пространственные и временные отрезки изменяются в движущихся системах, что скорость света сохраняет одно и то же значение при переходе от одной инерциальной системы к другой, так как само течение времени имеет определенный смысл только для данной системы. Таким образом, нет смысла говорить о едином времени для различных систем, если только задача не допускает приближенного представления о бесконечной скорости света. Единое для Вселенной время (в качестве его линейных функций рассматривались координаты тел, движущихся по инерции) — стало приближенным понятием, пригодным лишь для определенного круга задач.

При всей глубине переворота, произведенного специальной теорией относительности, сохранилась основа классической картины мира — представление об абсолютно себестождественных дискретных телах, движущихся одно относительно другого. В непрерывном пространстве движутся дискретные тела, их взаимные расстояния — функции непрерывного времени. Это традиционное разделение реальности на пространственно-временной континуум и движущиеся в нем дискретные тела сохранилось, когда из картины мироздания исчез непрерывно заполнявший пространство эфир и потеряло смысл понятие

скорости тел относительно заполненного неподвижным эфиром пространства. Более коренные изменения внесла общая теория относительности. Она покончила с противопоставлением движения в гравитационном поле инерционному движению, сопоставив гравитационное поле искривлению пространства и времени. Если классическая механика считала, что тела движутся по прямым (т. е. по кратчайшим в евклидовой геометрии) мировым линиям в отсутствие силовых полей, то общая теория относительности утверждает, что тела и в гравитационном поле движутся по кратчайшим (геодезическим) линиям. Вообще говоря, гравитационное поле означает лишь отклонение от евклидовых соотношений в четырехмерном пространственно-временном континууме, искривление этого континуума. Здесь поле как бы растворяется в пространстве-времени с определенными, зависящими от скопления масс, геометрическими свойствами.

Дальнейшие радикальные изменения принесла с собой боровская модель атома и выросшая из нее в результате открытий двадцатых годов квантовая механика. Здесь уже само движение частиц, соединяющих корпускулярные свойства с континуально-волновыми, не может рассматриваться как непрерывное. В картине мира, нарисованной квантовой механикой, траектория частиц перестала быть непрерывной. Здесь угроза нависла над основой основ классической физики — идеей себестоимости частицы.

В классической физике, заметив некую частицу, мы можем «узнать» ее в будущем — частицу можно идентифицировать. Основой такой идентификации служит непрерывная траектория частиц. Но в квантовой механике уже нельзя говорить о непрерывной траектории; во всяком случае нельзя одновременно точно определить положение частицы и ее импульс. Такая невозможность отражает объективные свойства микрочастиц. Все дело — в условном, корпускулярном представлении о некоторых сложных явлениях, гораздо более сложных, чем перемещение себестоимой частицы. Представим себе в некоторой точке пространства более или менее локализованный физический процесс. Этот процесс вызывает в данном пункте физические эффекты, которые можно с известной точностью рассматривать как проявления

свойств частицы. Представим себе далее, что в некоторый близкий момент времени в другом, также близком пространственном пункте будет происходить аналогичный процесс, который также получает условное корпускулярное представление. Возможно ли при наличии двух таких процессов утверждать, что некоторая себестождественная частица перешла из одного пункта в другой? Квантовая механика находит такую возможность, но вместе с тем указывает на ее условность. Основой для отождествления частицы, находящейся в одном пункте, с частицей в другом пункте служит непрерывность движения; но как раз такая непрерывность может быть приписана квантовому объекту лишь в условном и приближенном смысле.

Релятивистская квантовая механика и квантовая электродинамика Дирака, а также экспериментальные открытия порождения, аннигиляции (вообще — трансмутации) элементарных частиц нанесли, наконец, удар основному постулату классической физики, постулату себестождественности физического объекта. Классическая физика исторически и логически началась с того, что противопоставила аристотелевским качественным изменениям пространственные перемещения материальных частиц. Частица движется — это значит, что изменяется ее положение; но частица остается тождественной себе, она не превращается в другую частицу. Подобные качественные трансмутации исключены для элементарных частиц — качественные изменения сводятся к изменениям конфигурации системы, т. е. к движениям себестождественных частиц.

Эта первая абстракция — самая общая основа классической физики. Себестождественная частица является предельным понятием, основой научного объяснения. Сама она не подлежит дальнейшему каузальному истолкованию. Различные периоды развития классической физики характеризуются тем, какие именно дискретные части материи выполняли роль элементарных частиц — предельных понятий каузального анализа. Молекулярная физика XIX в., игнорируя или рассматривая как малосущественную проблему размеров и структуры молекул, объясняла макроскопические явления движением молекул; именно макроскопические явления и были объектом каузального объяснения. Молекулярная физика была

физикой макроскопических систем с очень большим числом степеней свободы.

Величина и структура молекулы были предметом каузального изучения в классической химии. Что же касается собственно физики, то она изменила свой основной объект изучения с возникновением физики атома. При этом роль предельных понятий стали играть электроны и атомные ядра. В моделях атома, фигурировавших в физике первой четверти XX столетия, электроны и ядра рассматривались как простые объекты. Конечно, никто не приписывал, по крайней мере ядру, нулевого размера; напротив, его величину, как и радиус электрона, вычисляли, но вычисленные размеры оставались феноменологическими элементами, вкрапленными в каузальную картину атома.

Явления, стоявшие несколько особняком в картине атома, получили объяснение в физике ядра. В последней предельными, феноменологическими понятиями стали элементарные частицы. Сейчас, с развитием общей теории элементарных частиц, положение меняется. Элементарные частицы, фигурировавшие в атомной и ядерной физике как предельные понятия (несмотря на не исчезающие, но и не стоявшие в центре физики вопросы о «размерах», «структуре» и природе их массы, заряда и спина), становятся основным объектом физики, переходящей благодаря этому в новый период или, по крайней мере, приближающейся к нему.

В течение всех перечисленных периодов, когда физика рассматривала в качестве основного объекта изучения сначала макроскопические системы, затем атом и, наконец, ядро, предпосылкой физических теорий было представление о себестождественной частице, которая меняет координаты, оставаясь собой, не исчезая, не возникая и не превращаясь в другую частицу. Даже трансмутация частицы рассматривалась как превращение одной себестождественной частицы в другую себестождественную частицу.

Основой физической теории было противопоставление частицы пространству, в котором она движется. Координаты рассматривались как акцидентальные свойства некоторой отличающейся от пространства субстанции. Правда, представление о себестождественной частице,

отличающейся от окружающего ее пространства, стало несколько относительным в релятивистской и квантовой физике. Но хотя релятивистская физика и привела в своем развитии к представлению о движущейся частице как сингулярности непрерывной среды, она не покушалась прямо на ее себестождественность. Квантовая механика, несмотря на принципиальный отказ от отождествления квантового объекта с классической частицей, обладающей одинаково точными значениями составляющей импульса и сопряженной с ней координаты, пользовалась корпускулярным представлением, указывая на неточность классической аналогии. Современная квантовая механика ограничивает классическое представление о себестождественной частице, но не выводит его из более общей неклассической теории.

Существуют попытки обобщения релятивистской квантовой теории и построения новой теории, в которой основные положения квантовой механики и теории относительности должны быть выведены непротиворечивым образом из представления о трансмутациях элементарных частиц в элементарных клетках пространства и времени. Однако нет еще даже элементов такой обобщенной теории. То, что появилось, это лишь заявки на теорию. Для историка физики они создают некоторую исходную позицию. Если движение себестождественной частицы может рассматриваться как некоторая аппроксимация трансмутационного процесса (например, как регенерация определенной частицы, превращающейся в другую в одной точке и затем возникающей из другой частицы в соседней точке<sup>1</sup>), то в историческом плане не только различные сменявшие друг друга классические теории, но и классическая физика в целом, ее основные и исходные постулаты представляются аппроксимацией. Подчеркнем, основные и исходные. Речь идет уже не об абсолютном характере времени, инвариантности пространственных и временных интервалов, классическом правиле сложения скоростей, постоянстве массы, не о тех классических принципах, которые оказались аппроксимациями в теории относительности. Речь идет о более коренных основах

---

<sup>1</sup> См. Я. Френкель. ДАН СССР, 64, 4, 1949; УФН, 42, 67, 1950; 44, 104, 1951.

классической картины мира. Эти основы сохранились при релятивистском обобщении классической физики и с оговорками и ограничениями фигурируют в квантовой механике. Мы будем понимать под классической физикой совокупность утверждений, основанных на признании себестождественной частицы, т. е. частицы, обладающей непрерывным существованием, непрерывной мировой линией. Однако в дальнейшем будут рассматриваться лишь те основные принципы классической физики, которые были высказаны до ее релятивистского обобщения, т. е. до начала XX в. Эти принципы в своем развитии не только подготовили физику нашего столетия в части исходных понятий, не только дали толчок созданию математического аппарата, необходимого современной физике. Они подготовили современную науку своим мощным преобразующим воздействием на всю цивилизацию, на развитие техники, культуры, философской и общественной мысли.

В частности, следует, забегая вперед, указать на вырвавшуюся из основных принципов физики XIX в. мысль о несводимости сложных форм движения к более простым, о бесконечной сложности мира, о нелинейности его закономерностей. Эта мысль, так ярко отразившаяся в философии и в стиле научного мышления XIX в., отличает этот век от предшествующего.

Для культуры XVIII в. характерна идея однозначности, строгой и точной зависимости одних явлений от других. Высшее и крайнее выражение этой идеи — знаменитый лапласовский образ существа, знающего положения и скорости всех частиц Вселенной и могущего предсказать последующее развитие природы и судьбы людей вплоть до исторических и бытовых деталей. Наука располагает явления в цепочки причин — следствий, вырывая их из всеобщей и бесконечной космической связи; она, по выражению Н. Н. Шиллера, интересуется «продольными связями», отменяя бесчисленные «поперечные» связи, искажающие и осложняющие простую зависимость. С течением времени наука узнает и об этих «поперечных» связях, но она стремится и их разложить на простые «продольные» связи. Примером может служить ньютонова теория тяготения и представление о возмущениях. Ньютон объявил основой мироздания закон, согласно

которому два тела притягивают друг друга с силой, пропорциональной их массе и обратно пропорциональной квадрату расстояния. Но указанная зависимость — абстракция: в действительности каждое тело испытывает тяготение со стороны бесконечного числа других тел. Классическая механика последовательно переходит от абстрактной картины двух тел к более конкретной картине трех тел, рассматривая третье тело как источник возмущения, ~~осложняющего первоначальную простую задачу.~~ Нужно сказать, что и два тела в пустоте это сравнительно сложная и конкретная картина. Первоначальная абстракция — единственное тело, движущееся в пустоте. Оно движется прямолинейно и равномерно, его координаты — линейные функции времени. Каждый новый шаг в развитии механической картины мироздания должен был восстановить линейную зависимость пространственных величин от времени. Такая линеаризация достигается переходом к сравнительно малым областям. В первоначальной картине одного движущегося тела — предельной абстракции механического естествознания — пространственной величиной, линейно зависящей от времени, служит положение тела. Затем естествознание в лице Ньютона вспоминает о законах Кеплера, об ускорении небесных тел, сближает эти ускорения с ускорениями земных тел и переходит от первого закона «Начал натуральной философии» ко второму. Однако ускоренное движение представляется равномерно ускоренным; говоря современным языком, имеется в виду однородное силовое поле, и теперь линейной функцией времени оказывается скорость. Эта тенденция — линеаризация первых, а затем вторых производных от координат по времени — характернейшая особенность ньютоновой механики. Сначала координаты, затем скорости, ускорения и т. д., рассматриваются как линейные функции времени. Линеаризация лежит в основе математического анализа. Наука интересуется линейными отношениями рассматриваемых величин, она вводит понятие дифференциала — линейной части приращения функции — и производной — отношения приращений, сохраняющегося в бесконечно малой области.

Линейный характер связей между конечными величинами соответствует действительности лишь в той мере,

в какой законно абстрактное выделение рассматриваемых величин из бесконечной космической связи явлений. Картина прямолинейного и равномерного движения по инерции соответствует действительному положению вещей, пока можно пренебречь силовыми полями; картина равномерно ускоренного движения — пока рассматриваются однородные поля. Математическое представление ярко демонстрирует условность каждого шага абстрактного анализа. Такая условность становится осязаемой и при философском обобщении естественнонаучных знаний. Но часто виток познания абсолютизируется и условная абстракция представляется абсолютно точным эквивалентом реальности.

Идея линейной связи, представление о неизменной зависимости двух величин, независимой от изменения этих величин и сохраняющейся при неограниченном их возрастании или уменьшении, оказало колоссальное влияние на науку и культуру XVIII в. «Анти-Дюринг» начинается яркой характеристикой основной идейной тенденции XVIII в. в той форме, какую она приняла у энциклопедистов. Последние приписывали абсолютный характер абстрактным конструкциям, с помощью которых разум постигает природу и общество. Познание природы и общества, а вместе с тем рациональное преобразование мира не было для них бесконечным процессом, так как они не видели бесконечной сложности мира. Научный, культурный и общественный прогресс должен был закончиться некоторым идеальным состоянием, разум должен был найти в природе последние, абсолютно точные закономерности и, вместе с тем, построить некоторую абсолютно рациональную систему общественного устройства. «Великие люди, которые во Франции просвещали головы для приближающейся революции...» призывали пред судилище разума естествознание, религию, политические доктрины и осуждали все, что противоречило разуму. «Это было то время, когда, по выражению Гегеля, мир был поставлен на голову, сначала в том смысле, что человеческая голова и те положения, которые она открыла посредством своего мышления, выступали с требованием, чтобы их признали основой всех человеческих действий и общественных отношений, а затем и в том более широком смысле, что действительность, противоречащая

этим положениям, была фактически перевернута сверху донизу»<sup>1</sup>.

В этой рационалистической атаке естествознание играло первостепенную роль. В природе, подчиненной строгим однозначным закономерностям, не осталось места для иррациональных сил, и мистические грезы средневековья вместе с католическими догмами были осуждены и отброшены. Нельзя охватить колоссальное прогрессивное значение этой идейной революции, подготовившей политическую революцию конца века. Но господствовавшее в науке XVIII в. рационалистическое мировоззрение включало мысль об окончательном и абсолютно точном характере тех однозначных связей, которые наука находит в природе. Так же как общественная несправедливость казалась результатом простого незнания истины, и в естествознании рациональные схемы однозначно и абсолютно точно детерминированных событий противопоставлялись незнанию. Случайность принимала вид чисто субъективной категории — меры незнания. Идеал научного прогресса — космическая схема до конца познанных и предсказанных с абсолютной точностью, однозначно детерминированных событий — казался не только достижимым, но и сравнительно близким. Только в следующем столетии стала явной отрицательная сторона абсолютизации «царства разума» — идеализированного господства буржуазии и абсолютизации абстрактных понятий естествознания. Нужно сказать, что сама наука XVIII в. включала идеи, послужившие в своей развитой форме орудием в борьбе против метафизического абсолютизации теоретических и практических результатов этого столетия. Речь идет о философском и математическом обобщении этих результатов.

Написанный только что термин нуждается в пояснении. Научная теория дает вообще говоря однозначные количественные результаты, сопоставимые с экспериментальными данными, если она включает ограничительные допущения. Например, современная электродинамика выводит однозначные результаты из общих принципов, ограничивая рассматриваемую область явлений предположением о том, что эти явления соответствуют линейному характеру уравнений электромагнитного поля,

<sup>1</sup> Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. М., 1953, стр. 16—17.

порядку производных в этих уравнениях и постулату непрерывности пространства и времени. Обобщение современной электродинамики означает модификацию ее законов в предположении существенной нелинейности уравнений, наличия в уравнениях производных высшего порядка и дискретности пространства и времени. Обобщенная теория рассматривает явления, для которых существенно отступление от указанных выше ограничений. Аналогичным образом классическая механика, исходя из общих принципов однородности пространства и времени, вводила известные ограничения, допускавшие сопоставление теоретических результатов с экспериментальными данными. Феноменологическая традиция отказывала науке в праве на обобщение ее результатов применительно к областям, где пока невозможна или еще не произведена экспериментальная проверка, следовательно, — в праве на гипотезу. Но философское обобщение науки уже в XVIII в. включало гипотезы, в которых экспериментально установленные закономерности не только распространялись на неисследованные области, но при этом модифицировались. Атомистические концепции в XVIII в. носили именно такой гипотетический характер и были тесно связаны с обобщением ньютоновой механики на микромир. Они позволяли рассматривать Вселенную в ее развитии и таким образом прорывали метафизическую картину раз навсегда данного миропорядка.

Дифференциальные уравнения классической механики определяют положения и скорости тел в любой момент, если известны начальные условия. Для небесной механики такими начальными условиями служат скорости инерционного движения планет. Феноменологическая традиция отказывалась от ответа на вопрос о первоначальном толчке. Ньютон предоставил этот толчок богу. Философское обобщение ньютоновой механики в «Естественной истории неба» привело к космогонической концепции, в основе которой лежала гипотеза первичной туманности. При этом Кант приписывал специфические свойства частицам, беспорядочное движение которых в конце концов привело, по его мнению, к образованию солнечной системы. По существу дело шло о новой, несводимой к механике (это, впрочем, поняли только в XIX в.) форме движения — о молекулярном движении. Для него

механические законы требуют известных оговорок и дополнений (об этом тоже узнали лишь сто лет спустя). Таким образом, философское обобщение естествознания приводило к диалектической мысли — правда в зачаточной форме — о конкретности истины, т. е. об ограничении каждой оценки «истинно — ложно» конкретными рамками данной задачи.

Различие между рационалистическим «линейным» мышлением XVIII в. и мышлением XIX в., учитывающим бесконечную сложность мира, видно не только в науке и в философии, но и во всей культуре двух веков, в частности в художественной литературе. Общеизвестно, как тесно последняя была связана с наукой в XVII—XVIII в. Ясная и точная литературная проза в Италии была создана в значительной мере Галилеем. В XVIII в. литература еще шире отражала новый тип мышления. Революционный переход от телеологических идей средневековой схоластики к каузальной картине однозначных, в элементарных процессах линейных, связей повлиял не только на общественно-философскую мысль. Повседневная жизнь, обыденное мышление людей в значительной мере изменили свой характер. А. Муратов заметил на одной из страниц своей известной книги «Образы Италии», что намерения и поступки героев «Опасных связей» определяются убеждением в однозначной зависимости результатов от предпринятых ими действий. У Вальмона нет и тени сомнения, что на каждый его ход может последовать только один единственный ответный ход...

Вскоре выяснилась иллюзорность абсолютной однозначности. Художественным произведением, в котором отразилось новое, неизвестное XVIII в. ощущение бесконечной сложности действительного, многокрасочного мира, наличия нелинейных зависимостей, взаимодействий переменных отношений, бесчисленных «поперечных» связей, является «Фауст». Антиньютонианская атака Гете провозглашает новый взгляд на природу. Никогда еще не было высказано с такой энергией и художественной силой ощущение многокрасочности мира. Гете, видевший, по словам Эмерсона, «даже порами своей кожи», стремился охватить мир в его непосредственной сложности, без расчленения на абстрактные цепочки линейных зависимостей. Он протестует против границ, отделяющих одну

частную задачу от других, протестует против абстрактно теоретического или экспериментального расчленения природы. Гете считает антропоморфными и теоретический анализ, и эксперимент: они вносят в природу несвойственные ей понятия. «Теория, друг мой, сера, но зелено вечное древо жизни» — основной принцип научного мировоззрения Гете. Причинное объяснение явлений охватывает только некоторые стороны их и раскладывает явления в длинные нити причин и следствий. Но в этих нитях — говорит Гете — теряются другие связи явлений, которые не входят в получившиеся причинные ряды. Излагая эти мысли Гете, Шиллер говорил, что причинное объяснение «принимает в расчет только длину, а не широту природы». Напротив, Гете видит «всю природу во взаимодействии... и поэтому остерегается принимать причинность лишь в виде скудной длины: он всегда берет в расчет в ширину». Чтобы не исказить природу вносимыми извне абстрактными категориями, нужно брать действительность такой, какой она представляется созерцанию, т. е. во всем ее конкретном многообразии. Разумеется, Гете не делает крайних выводов из своей односторонней позиции. Роза Люксембург как-то сказала, что великие люди вообще не делают абсурдных выводов из своих ошибочных воззрений, они предоставляют это делать элитонам. Гете допускает необходимость теоретического расчленения природы, но мысль о его относительности обезвреживает абстракцию: «уже при каждом внимательном взгляде на мир мы теоретизируем, но необходимо делать это сознательно, с самокритикой, со свободой и — пользуясь смелым выражением — с некоторой иронией; необходимо, чтобы опасные абстракции стали безвредными, а опытный результат живым и полезным».

Это слово — «ирония» очень точно передает мысль Гете. Оно означает не только «несерьезное», т. е. не абсолютизирующее, отношение к абстракциям, иначе говоря, понимание их условности, ограниченности, неизбежной модификации при переходе к конкретным вопросам, но и понимание подчас «смешной», т. е. неожиданно неуместной, роли абстракции в конкретных областях.

Влюбленный в природу романтик увидел многое ускользавшее от внимания цеховых ученых. Работы Гете в области биологии имели для своего времени существен-

ное значение. На характер научного мышления большее влияние оказали, однако, строфы «Фауста».

Конечно, только путем предварительного расчленения непосредственно наблюдаемой действительности с помощью абстрактных схем можно впоследствии прийти к природе во всем богатстве ее многокрасочных связей и элементов<sup>1</sup>. Поэтому идеи Гете не могли изменить основное направление развития науки XVIII—XIX вв.— восхождение от исходных абстракций «Начал натуральной философии» ко все более конкретным построениям. Но борьба против догматизирования абстракций ускорила движение науки в этом направлении.

В старой философии вершиной свойственного XIX в. понимания бесконечной сложности и противоречивости мира, условности абстракций и их логической и исторической ограниченности была диалектика Гегеля.

Диалектическая философия в той систематической форме, в которой ее изложил Гегель, вопреки субъективным намерениям официального королевско-прусского философа, таила в себе революционные общественные выводы и революционную программу в науке. Педантичные, темные и неуклюжие периоды Гегеля скрывали революционные общественные выводы<sup>2</sup>. В философских произведениях Гегеля скрывались и новые естественнонаучные идеи. Но влияние диалектической философии не было бы столь ощутимым, если бы наука XIX в. не пришла к новым представлениям в результате практического применения естественнонаучных знаний предшествовавшего столетия.

В одной из статей, написанных в 1843 г. («Положение Англии. Восемнадцатый век»), Энгельс говорит, что «науки приняли в XVIII в. свою научную форму и вследствие этого сомкнулись, с одной стороны, с философией, с другой — с практикой». Результатом их сближения с философией был материализм (имевший своей предпосылкой в такой же мере Ньютона, как и Локка), эпоха Просвещения, французская политическая революция. Результатом их сближения с практикой была английская социальная революция<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> См. К. Маркс. К критике политической экономии. М., 1952, стр. 213.

<sup>2</sup> См. К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. XIV, стр. 635.

<sup>3</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 1, стр. 608.

Присоединение механического естествознания к философии было существенной стороной предреволюционного идейного движения во всей Европе. Во Франции, после того как Леруа противопоставил физику Декарта его метафизике, Кондильяк направил сенсуализм Локка против всей метафизики XVIII столетия. Английский материализм изменился на французской почве, он стал оружием, прямо направленным против абсолютизма и церкви. В арсенале этого оружия была и механика Ньютона. Когда Вольтер начал пропагандировать ньютоновство во Франции, и церковь, и правительство быстро поняли его социальный смысл. Вольтеровы «Элементы философии Ньютона» не могли быть напечатаны во Франции, несмотря на то, что в них прямо не затрагивались политические и религиозные догматы. Множество людей смеялось над тем, что ньютоновство распространялось через салоны. Но этот широкий охват нецеховых слоев означал лишь связь с общественным движением.

Не деист Вольтер, а философы-материалисты и естествоиспытатели-математики лишили ньютоновство его теологического привеска. Когда в руках Лагранжа классическая механика приобрела характер чисто математической дисциплины, это имело двойкий смысл. Из механики исчезли не только кинетические гипотезы, но и всевозможные теологические мотивы, которые с легкой руки Котса получили достаточно широкое распространение на родине Ньютона и на континенте. Во Франции в иных условиях общественной борьбы классическая механика Ньютона сыграла гораздо более последовательную революционную роль, чем в Англии. Здесь политическая революция последовала за идейной. Уже в ходе Французской революции бабувисты (они в большей мере, чем другие деятели революции, восприняли выводы материализма и естествознания XVIII в.) увидели, что «царство разума» сохраняет и увековечивает общественное неравенство. Но бабувисты были лишь провозвестниками новых общественных сил, выступивших против буржуазного строя после его исторической победы. Эти новые силы выросли в результате промышленной революции, начавшейся в Англии, охватившей затем все передовые государства и приведшей к современной фабричной индустрии и классовым битвам пролетариата.

Промышленный переворот в последнем счете объясняет новый стиль, свойственный физике XIX в. по сравнению с физикой XVIII в. Разумеется, содержание физических принципов не зависит от исторических условий, но от последних зависит время, место и формы открытия этих принципов, т. е. те вопросы, которые являются основными для истории физики и отделяют ее от самой физики. С этой точки зрения следует разграничить механический переворот в промышленности и переворот, произведенный паром, со всеми его социальными и культурными последствиями, охватывающими конец XVIII в. и в еще большей степени первую четверть XIX в.

Механизмы XVIII в., так же как и механические двигатели предшествовавшего столетия, превратили производство в прикладное естествознание в том смысле, что они расчленили производственную технику на элементарные процессы, допускавшие рациональную причинную трактовку. Это изгнало из производства (далеко не полностью!) ремесленные тайны, так же как система однозначных законов механики изгнала из науки (также не полностью) иррациональные понятия средневековья. Но революция, произведенная паром, включила в число сознательно применяемых сил природы силы, которые не могли быть объяснены однозначными динамическими закономерностями, известными науке XVIII в. Прежде всего упругость пара, как это сравнительно быстро выяснилось,— макроскопический результат большого числа молекулярных движений, подчиненных в своей массе статистическим закономерностям. Этот факт был наиболее важным исходным пунктом новых по сравнению с XVIII в. физических идей. В этом же направлении ограничения сферы действия механических законов действовали косвенные результаты революции, произведенной паром,— расширение круга экспериментально исследуемых процессов и совершенствование техники физического эксперимента. В явлениях электричества и оптики физика столкнулась с процессами, допускавшими механическое объяснение лишь в форме условных аналогий. Для естествознания в целом изменения в производстве, подчас отдаленно связанные с паровой машиной, также заставляли науку в некоторой мере отступить от догматов механического естествознания XVIII в. Упомянем только

о рациональном сельском хозяйстве, которое дало отправные наблюдения, положенные в основу дарвинизма, этого наиболее важного для стиля научного мышления XIX в. открытия статистических закономерностей в природе.

Выросшая на основе революции, произведенной паром (включая все технические, социальные и культурные последствия этой революции), классическая физика XIX в. создала научные предпосылки нового технического переворота. Этот переворот был произведен электричеством. Он не ограничился промышленной энергетикой, транспортом, освещением и связью. Косвенными результатами электрификации производства оказались впоследствии специализированные станки, поточные методы, различные формы промышленной автоматике и далее — новые, собственно технологические приемы, распространение электроемких процессов производства, применение качественных сталей и специальных сплавов. Важнейшей особенностью переворота, произведенного электричеством, было новое соотношение между энергетикой и технологией. Коренные изменения в энергетике в эпоху гидравлических двигателей и даже в эпоху пара, вызывали в конце концов изменения и в собственно технологической области, т. е. в сфере рабочих машин. Но сама по себе энергия водяных колес и паровых машин могла быть доставлена старым рабочим машинам, так как посредствующим звеном между двигателями и рабочими машинами оставалась механическая трансмиссия. Электрификация производства коренным образом изменяет положение. Отныне энергия подводится к потребителям в немеханической форме. Когда ее преобразуют в механическую работу, это бывает связано с новыми исполнительными механизмами, обеспечивающими несравнимо более высокую автоматизацию производства. В иных случаях электричество не превращается в механическую работу, начинает играть роль непосредственного технологического агента (электротермия, электролиз), и это связано с еще более глубоким изменением технологии. Указанная реконструктивная функция электрической энергии в производстве имеет первостепенное значение. Применение электричества в производстве пропорционально не только объему производства, но и скорости технического прогресса в производстве, быстроте технической реконструкции, темпам перехода от одной техники к другой.

Применение электричества пропорционально производной по времени от уровня технического развития производства. Эта особенность переворота, произведенного электричеством, не находит аналогий в ходе более ранних технических переворотов. Результаты ее неисчислимы. Расчленение технологического процесса на элементарные механические операции разбило консервативную техническую базу мануфактуры и сделало производство подвижным, превратив его в прикладное механическое естествознание. Паровая машина сделала темпы технического прогресса еще более высокими. Но все это несравнимо с электрификацией, при которой рост новой энергетической базы неотделим от качественного преобразования техники во всех отраслях производства, в ходе которой возникает указанное только что соотношение между уровнем энергетики и скоростью роста уровня технологии.

Пар и затем электричество изменили соотношение между производством и наукой. Промышленный переворот XVIII в. — механические прядильные и ткацкие станки — был применением классической механики в том смысле, что расчет станков и двигателей состоял в решении простых, механических задач. Теперь дело изменилось. Изучение паровых машин не могло ограничиться механическими расчетами, оно требовало эксперимента, причем собственно физического эксперимента. Пар эмансипировал физику от механики и вместе с тем сделал ее экспериментальной наукой. Физические эксперименты производились и раньше. Но они были спорадическими и были отделены от производства. В XIX в. физические эксперименты отвечали на непосредственные запросы производства, в первую очередь — производства и эксплуатации паровых двигателей, а в конце столетия, в растущей степени, на запросы практической электротехники. Конечно, физический эксперимент обладает внутренними закономерностями, в силу которых развертывание экспериментальных исследований в одной области вызывает новые эксперименты в смежных и даже в отдаленных областях.

Именно эксперимент придал физике XIX в. антидогматический характер, противопоставивший ее науке XVIII в. Эта не значит, что последняя была догматической. В свое время она сама была направлена против догматов перипатетизма. Но в XIX в. механическая ограниченность есте-

ствознания, трещавшая под напором новых фактов, была догмой, и основные, специфические для нового периода открытия противопоставили традиции XVIII в. новые концепции и методы. Каковы же эти концепции и методы, и почему эксперимент был основой их гелезиса и расцвета?

Механический рационализм XVII в. провозгласил принципиальную возможность чисто логического выведения всех без исключения законов природы из некоторых общих универсальных принципов. Если физические величины связаны одними и теми же закономерными соотношениями, если эти соотношения сохраняются при неограниченном увеличении и уменьшении физических величин, то, зная эти соотношения, можно логическим путем построить всю систему мира, охватывающую и космические и микроскопические области. Таким путем шел Декарт и другие мыслители XVII—XVIII вв., создавшие кинетические картины мира, логически распространяя механические законы на мир невидимых частиц. Но этот путь не приводил к однозначным результатам. Сущность логики состоит в возможности сформулировать соотношения, найденные в конечном числе наблюдений для конечных областей, в качестве всеобщих суждений, справедливых для бесконечных областей. Логика позволяет инфинизировать эмпирически найденные закономерности; но только эксперимент может установить границы, в которых такая инфинизация не лишает соотношения и закономерности однозначного физического смысла и объективного значения.

Такой взгляд на эксперимент противоречит господствующим концепциям XVIII в. и характерен для XIX столетия. Указанная роль эксперимента означает, что действительные закономерности мира несводимы к исходным простым схемам. Законы механики были экспериментально доказаны для определенного круга явлений. Универсальны ли эти законы? Декрет утверждает их универсальность — без экспериментальной проверки он переносит макроскопические законы в любую область. Ньютон ограничивает область научного знания кругом явлений, допускающих экспериментальную проверку, и счел неохотно говорит о микромире и эфире. Но логическое обобщение экспериментально найденных закономерностей с экспериментальной проверкой их в новых областях, с основанной на

экспериментальных данных модификацией, усложнением, пересмотром общих исходных схем — эта задача принадлежит XIX в.

В пределах механицизма существовало, таким образом, двойное отношение к эксперименту и гипотезе. Картезианское представление об универсальности механических законов придает кинетическим гипотезам, основанным на применении законов механики к космогонии и микромиру, характер абсолютной достоверности. В сущности у Декарта речь идет не о гипотезах в современном смысле, а о непререкаемых выводах из общих схем. Ньютоновское представление о законах механики ограничивает их действие областью явлений, где эти законы уже получили экспериментальное подтверждение, и отрицает гипотезы, хотя последние в действительности неустраиваемы и неясно присутствуют в содержании «Начал натуральной философии». Чего не знали ни картезианская, ни ньютоновская физика — это гипотез, основанных на модификации механических законов, на введении понятий, несводимых к механическим законам, но связанных с ними. Экспериментальная проверка таких немеханических по своему характеру гипотез — характерная черта физики XIX в.

Она теснейшим образом связана с особенностями производственной техники. Когда создатели классической термодинамики пришли к идее необратимости, экспериментальная проверка их выводов была неотделима от изучения циклов тепловых двигателей. Когда творцы классической электродинамики от Фарадея до Максвелла и Лоренца последовательно вводили немеханическое по своему объективному смыслу представление о полях, экспериментальная проверка результатов была очень близка к работам над трансформаторами, генераторами, двигателями, а впоследствии и электрическими вибраторами и резонаторами, получившими применение в радиотехнике. В средние века спорадические эксперименты должны были демонстрировать мистические «симпатии» и «антипатии». В XVII—XVIII вв. эксперименты демонстрировали механический характер изучаемых процессов и задача экспериментатора состояла в очищении механического субстрата явлений от несущественных для естествоиспытателей того времени немеханических процессов. В XIX в. эксперименты, наиболее характерные для нового направления физики,

демонстрировали несводимость физических закономерностей к механике. Впрочем, некоторое предвосхищение такой теории эксперимента мы встречаем у энциклопедистов. Это не удивительно: XIX в. в науке во многих отношениях начался в XVIII в. В мировоззрении энциклопедистов, несмотря на весь их механический рационализм, уже сказались объективные тенденции, которые внутри механики подготавливали аппарат и некоторые идеи несводимой к механике физики, опиравшейся на эксперимент при модификации общих схем. Д'Аламбер в 1759 г. в «Опыте об элементах философии или о началах человеческого знания с пояснениями» писал об областях, где «каждый частный случай требует почти отдельного опыта» и где «общий результат всегда ненадежен и несовершенен...»<sup>1</sup>.

У мыслителей XVIII в. немало таких замечаний; они не меняют общей оценки мировоззрения эпохи и только лишний раз показывают, что господствующее направление мысли не означает исключительного направления. Все дело в том, что в XIX в. уже не было надобности в подобных заявлениях о необходимости эксперимента; эксперимент, именно эксперимент, проверяющий законность общих схем применительно к конкретным областям, стал в значительной мере содержанием естествознания. Как известно, в XIX в. делали то, о чем в XVIII в. говорили (за вычетом общественно-политических проблем, где немецкие философы в XIX в. говорили о том, что французы уже сделали на исходе XVIII в.).

Характерные для XIX в. физические эксперименты исторически вынуждались развитием производства, использующего такие явления природы, в познании которых законы механики не могут служить без добавочных, эмпирически найденных понятий. Самая яркая иллюстрация уже приводилась — это необратимость, невозможность перехода тепла от холодного тела к нагретому. Необратимость, выяснившаяся при изучении паровых машин, могла быть связана с законами механики лишь статистически.

Когда производство стало прикладной механикой, это дало ему силы для быстрого развития в определенных рамках, в рамках преобразований механической работы. Когда

---

<sup>1</sup> D'Alambert. Oeuvres, 1, p. 336, 1881.

да производство стало прикладной экспериментальной физикой, это дало ему силы для гораздо более быстрого развития без каких-либо рамок, для безграничного развития. Принципиальная возможность исследований и применения на практике любых сил природы, любых сколь угодно сложных форм движения, любых дискретных частей материи с помощью экспериментальной проверки и соответствующей модификации и усложнения исходных схем — такова первая черта науки XIX в. В указанном безграничном не только по объему, но и по сложности применяемых не только по объему, но и по сложности применяемых методов росте развития производства может быть заинтересован лишь пролетариат. Но этот вопрос имеет и другую сторону. Речь идет о философском обобщении естествознания.

Когда наука практически и по большей части стихийно обнаружила, что движение молекул и еще более сложное движение электромагнитных волн и электрических зарядов нельзя свести к механике, то обобщение этой идеи распространило ее на мироздание в целом, на природу и на общество. Философским обобщением науки XIX в. было утверждение, что истина конкретна, что нет раз навсегда данных абсолютных решений. Такая идея стала последовательным и стройным мировоззрением в философии диалектического материализма, и действительное философское обобщение физики и всего естествознания первых трех четвертей XIX в. было сделано в связи с идейной консолидацией пролетариата.

Следовательно, наука XIX в. — ее основные и наиболее характерные принципы — была общественной силой, которая подготовляла материальные условия революционной эмансипации пролетариата и на путях своего философского обобщения питала революционную идеологию пролетариата. Этому нисколько не противоречит тот факт, что подавляющее большинство естествоиспытателей XIX в., отделенное от пролетариата и его идеологии тысячами предрассудков своей среды, не видело и не могло видеть социальное значение и философский смысл своих открытий.

Философское обобщение естествознания XIX в. легло на плечи пролетариата. Его идеологи уже в сороковые годы создали диалектико-материалистическое мировоззре-

ние — наиболее важный итог всего развития человеческой практики и науки. В семидесятые годы очередные задачи классовой борьбы и консолидации пролетариата потребовали широкого освещения естественнонаучных проблем с позиций материалистической диалектики. В лице Дюринга метафизика, опиравшаяся, в частности, на игнорирование науки XIX в. и ее коренных отличий от науки предыдущего столетия, ополчилась против марксизма. Выступивший в качестве реформатора социализма Евгений Дюринг был, если не самым ожесточенным, то во всяком случае самым шумным противником диалектики, включая и стихийные диалектические тенденции в математике и естествознании. Крикливая брань в адрес Гете, «некоего» Гегеля, Дарвина и — уж, конечно — Маркса, попытки навязать немецким рабочим построения «системосозидающего» метафизика были непосредственным поводом для изложения идей марксизма в бессмертном произведении Энгельса, содержащем, в частности, экстракт тех идей классической физики, которые имели особенно большое значение для будущего. В «Анти-Дюринге», так же как в опубликованных гораздо позже фрагментах — «Диалектике природы», классическая физика трех первых четвертей XIX в. получила, наконец, подлинное философское обобщение. Такое обобщение указывало путь к новой физике.

В последующих главах этой книги мы попытаемся показать, как обобщение основных принципов физики этого периода вело к современным релятивистским принципам и подготавливало переход к неклассическим принципам дискретности действия и энергии, статистических закономерностей микромира, нетождественности элементарной частицы самой себе.

---

## II. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Исходным принципом механики служит принцип относительности. Первые шаги изучения природы и использования ее сил были связаны с индивидуализацией материального тела. Это тело со временем меняет свое расстояние от других тел. Пока эти «другие тела» по-прежнему представляют собой нерасчлененный фон движения рассматриваемого тела, мы не можем сопоставить положение тела и изменение положения тела с числовыми рядами, т. е. параметризовать положения и скорости тел. Выделение тел, относительно которых движется данное тело, и сопоставление расстояний с числовыми рядами превращает эти тела в тела отсчета и совокупности расстояний от этих тел в пространства отсчета. Числа, с которыми сопоставлены расстояния, группируются в упорядоченные системы, и таким образом вводятся связанные с телами отсчета координатные системы. Принцип относительности положений состоит в равноправности систем координат, в возможности перейти от одной системы к другой, в инвариантности внутренних свойств твердых тел, их структуры, расстояний между входящими в твердые тела частицами при указанном переходе.

Все развитие механики (да и сам генезис ее) связано с расширением представления об инвариантности физического объекта при переходе от одной системы отсчета к другой. В XVII в. была установлена не только независимость структуры тела от выбора системы координат, но и инвариантность соотношения между силой и ускорением при переходе от одной координатной системы к другой, движущейся относительно первой прямолинейно и равномерно. Таково, на языке современной физики, содержание великого открытия Галилея. Оно было подлинным началом

современного естествознания. Если Земля не является привилегированным телом отсчета, если во Вселенной вообще нет такого тела, значит, в пространстве равноправны все точки и все направления, пространство однородно и изотропно. Это — стержневая идея современного естествознания с его возникновения в XVII в. вплоть до наших дней.

Принцип относительности был сформулирован в отчетливой форме в пьютоновых «Началах» — в пятом «Следствии» из трех законов движения. Механика Ньютона не может, однако, обойтись без понятия абсолютного движения. Это понятие связано с силой и ускорением. Действие силы кинематически неоднозначно: если в одной системе отсчета сила вызывает одно ускорение, то в другой системе, движущейся относительно первой с ускорением, она может вызвать иное ускорение, в том числе нулевое. Поэтому абсолютное движение можно зарегистрировать лишь по его динамическим эффектам, по силам, возникающим в системе при ее абсолютном ускорении. Решающим экспериментом, доказывающим существование абсолютного движения и абсолютного пространства, Ньютон считал известный эксперимент с вращающимся сосудом с водой. Вода поднимается к краям сосуда; это не произошло бы, если бы сосуд оставался неподвижным, а окружающее пространство вращалось вокруг сосуда. Существование центробежной силы — решающий аргумент Ньютона в пользу абсолютного движения. Все содержание «Математических начал натуральной философии» и вся построенная Ньютоном система мироздания были связаны с мыслью, что центробежные силы нельзя объяснить действиями каких-либо конкретных материальных масс. Явления, известные Ньютону, при объяснении возникновения центробежных сил не давали основания относить вращение к конкретному физическому телу. Поэтому Ньютон относил вращение и ускоренное движение вообще к самому пространству. Каковы бы ни были попытки метафизического абсолютизации этого вывода, сам по себе он соответствовал астрономическим, механическим и физическим знаниям XVII—XIX вв.

Абсолютное пространство было понятием, позволившим Ньютону сделать ряд дальнейших шагов по сравнению с картезианским релятивизмом. Под абсолютным дви-

жением Ньютон понимал движение, отнесенное не к отдельным телам, а к пустому пространству. Абсолютное, неподвижное и пустое пространство Ньютона можно рассматривать в качестве представителя неопределенного числа дискретных материальных масс, «космического газа», заполняющего мировое пространство. Можно ли считать совокупность небесных тел привилегированным телом отсчета и приравнивать его к пространству как таковому? Здесь речь идет вновь о нерасчлененной реальности. Движение тела относительно пространства как такового означает противопоставление одного индивидуализированного тела нерасчлененному фону — всей остальной Вселенной. Ньютон относит ускорение к этому неопределенному фону. Но в каждой конкретной динамической задаче он должен был пользоваться некоторыми системами отсчета, связанными с конкретными материальными телами. Поэтому нужно различать покоящиеся условно, в рамках данной динамической задачи, конкретные тела и привилегированную систему отсчета, не связанную с конкретными материальными телами и фигурирующую в качестве абсолютного пространства в «Поучении», которое Ньютон поместил в «Началах» после исходных определений.

Оставим пока в стороне эту неопределенную концепцию абсолютного пространства и остановимся на понятии относительного движения. Это понятие ограничивается с переходом к системе, обладающей бесконечным или очень большим числом степеней свободы. Как только мы возвращаемся к нерасчлененному, сплошному, континуальному представлению, как только мы отказываемся от параметризации положения и движения отдельных тел и необходимых для нее координатных систем, противоположность абсолютного и относительного движения снимается. К тепловому движению частиц в некотором макроскопическом объеме понятие относительности неприменимо. Но пока мы ограничиваемся системами со сравнительно небольшим числом степеней свободы и можем непрерывно следить за положением и скоростью каждой материальной частицы, понятие относительности сохраняется. Абсолютно пустое пространство Ньютона могло бы поэтому получить рациональный смысл, если бы его можно было приравнять либо космическому газу, в котором скорости и положения отдельных частиц (небесных тел) не рассмат-

риваются, либо непрерывной среде. Абсолютное пространство и получило рациональный (хотя и опровергнутый впоследствии рядом экспериментов) смысл, когда оно приобрело у Лоренца характер заполняющего все пространство непрерывного эфира.

В физике в собственном смысле снимается противоположность абсолютного и относительного движения — стержневая коллизия механики, но сразу же начинаются другие коллизии. Через всю классическую физику проходит противоположность континуума (который в физике представляется или статистическим множеством дискретных частиц с игнорируемыми положениями и скоростями, т. е. результатом статистической континуализации, или реально непрерывной, не состоящей из дискретных частей сплошной средой) и механических моделей, в которых фигурируют дискретные тела с положениями и скоростями, относящимися к определенным системам отсчета. Мы оперируем в физике континуальной картиной пространства, непрерывного поля или условной непрерывной среды, в которой не рассматриваются дискретные части и игнорируются их координаты и скорости, т. е. величины, имеющие смысл только по отношению к избранным системам отсчета. Однако в физике в то же время фигурируют и механические понятия.

В свою очередь в механике наряду с относительными понятиями положения тел в пространстве существуют иные представления, имеющие смысл без указания системы отсчета. Прежде всего это тот континуальный фон, на котором выступают индивидуализированные тела, фон, к которому Ньютон относил ускорение тел и который он рассматривал как абсолютное пространство. Научное познание мира, начинающееся с выделения отдельных тел и их движений, сохраняет нерасчлененное и неопределенное понятие о пространстве, лишенном определенных опорных тел отсчета, пустом вместилище материальных тел. Такой нерасчлененный «остаток» после выделения отдельных тел казался Ньютону необходимой предпосылкой законов механики. Декарт в своем беспримерном по последовательности отрицании любых качественных различий в природе отождествлял пространство с материей и противопоставил окружающее пространство-материю отдельному телу, также отождествленному с занятым им местом.

Декарту было очень трудно сказать, чем же отличается тело от окружающей среды. Проблема индивидуализации физического объекта — камень преткновения физики Декарта — была обойдена картезианской релятивистской концепцией движения: тело движется «в истинном смысле» относительно непосредственно прилегающих к нему других тел и этим движением отличается от них. Но проблема была обойдена, а не решена; само понятие движения относительно других тел стало бессодержательным при отрицании различия между материей и пространством. Картезианский релятивизм не мог решить коренную проблему механического естествознания — проблему индивидуализации дискретных тел и не мог поэтому в историческом плане стать основой атомистики.

Идея континуума стояла особняком в науке XVII—XVIII вв., главным содержанием которой были собственно механические построения, имевшие дело с дискретными телами, их координатами, скоростями и ускорениями. Континуум был областью предельных понятий механики. Здесь сохранялось нерасчлененное бытие — фон, на котором выделялись дискретные тела, главный объект механики. Здесь можно было искать кинетическую разгадку сил. Вообще сюда устремлялась мысль теоретиков XVII—XVIII вв., задумывавшихся над смыслом предельных понятий, которыми они оперировали в механике. Самый стиль учения о континууме был иным по сравнению с механикой дискретных тел, учение о континууме имело несравненно более натурфилософский характер. Поскольку здесь не было основы параметризации — координатного представления, сюда не проникала математика.

Таким образом, закономерности движения дискретных тел — это основное содержание механики, в которой континуум играет роль предельного понятия. Механика отвечает на вопрос: почему частица находится в данное время в данной точке пространства. Она находит эту точку, зная действующую на частицу силу, т. е. исходя из силового поля, на основе уравнений движения. Уравнения поля выходят за рамки механики. Механика рассматривает поле как данное и независимое от рассматриваемого тела. Отсюда — линейный характер уравнений движения и уравнений поля. В первом случае мы предполагаем поле данным и независимым от движения рассматриваемой

частицы, во втором случае мы предполагаем материальные частицы — источники поля данными и независимыми от поля.

В физике предельные понятия механики получают каузальное истолкование. Для физики понятие силы (силового поля) — это понятие, подлежащее анализу. Физика определяет значения сил. В частном случае, когда частицы движутся без трения (т. е. силами трения можно пренебречь), силы можно представить как функции координат. Вид этих функций — проблема, которую должны решить теория тяготения, теория упругости, электродинамика и т. д. В теории тяготения, теории упругости, электростатике, магнетостатике и т. д. силы тяготения, упругости, электрические и магнитные силы рассматриваются иначе, чем в механике. Они уже не предельные понятия; напротив, задача науки состоит теперь в их физическом или формальном выведении из других величин.

Линия водораздела между механикой и физикой отделяет уравнения движения от уравнений поля. Как уже было сказано, и те и другие линейны, поскольку игнорируется взаимодействие между дискретными частицами и полем. Выделяя в своих абстрактных построениях некоторую материальную точку, механика рассматривает ее как чисто пассивную сущность. К ней приложена сила, но эта сила независима от самой материальной точки. В этом состоит предпосылка решения собственно механических задач. Соответственно, в теории поля силовое поле рассматривается как пассивная сторона, как функция независимой от поля частицы — источника поля. Определение движения по силам и определение силы в ее зависимости от координат были двумя задачами, поставленными Ньютоном в «Математических началах натуральной философии». Решая первую задачу, Ньютон исходил из сформулированных им аксиом движения. Вместе с тем в «Началах» решена и другая задача: определен вид функции, связывающей силы (гравитационные) с координатами. Это было в известном смысле началом классической физики. По образцу ньютоновой теории тяготения строились впоследствии другие отрасли физики.

Когда механика под влиянием развития физики включила в круг своих основных понятий скалярные величины, ньютоновы уравнения движения, позволяющие определить

положение материальных точек, если известны силы и начальные условия, уступили место иным уравнениям. На этой эволюции мы остановимся несколько подробнее.

Второй закон Ньютона может быть непосредственно выражен в виде уравнений движения. Он гласит, что первая производная от количества движения равна силе. В декартовой системе координат второй закон Ньютона выражается тремя дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dp_x}{dt} \equiv m \frac{d^2x}{dt^2} = X,$$

$$\frac{dp_y}{dt} \equiv m \frac{d^2y}{dt^2} = Y,$$

$$\frac{dp_z}{dt} \equiv m \frac{d^2z}{dt^2} = Z.$$

Написанные уравнения можно представить в форме уравнений равновесия. Такой переход указывается принципом д'Аламбера, высказанным им в 1743 г. в «Динамике». В этом трактате д'Аламбер пользуется понятием потерянных сил. Он рассматривает систему, состоящую из материальных точек, движения которых ограничены некоторыми связями. Сила, действующая на точку, может быть заменена двумя слагающими, одна из которых направлена по линии движения, согласующегося со связями. Если бы точка была свободна, она двигалась бы по диагонали параллелограмма, образованного двумя слагающими. В действительности точка движется так, как будто на нее действует только одна слагающая. Другая как бы теряется. Д'Аламбер назвал ее потерянной силой. Потерянные силы в системе исчезают, не вызвав ускорения точек; они уравновешиваются реакцией связи. Можно показать, что потерянная сила — это равнодействующая сил, действующей на точку, и сил инерции. Внешние силы (т. е. силы, источники которых не входят в рассматриваемую систему), действующие на материальные точки системы, силы реакции, определяемые условиями связи, и силы инерции находятся в равновесии. Иначе говоря, потерянные силы (равнодействующие внешних сил и сил инерции) уравновешены реакциями связей.

Силы инерции, введенные д'Аламбером, получили название фиктивных сил. Вводя эти силы, можно каждую

динамическую задачу свести к статической. Каждому уравнению движения соответствует уравнение равновесия, отличающееся от первого наличием фиктивных сил инерции.

Различие между реальными и фиктивными силами относительно. Силы, введенные д'Аламбером, будут фиктивными, только если их рассматривать как приложенные к данному телу; они являются реальными силами, если их рассматривать как силы, приложенные к другим телам. Если перенести начало координат с одного тела на другое, фиктивные силы станут реальными, а реальные — фиктивными.

Из второго закона Ньютона следует, что сила, действующая на движущееся тело, и ускорение, помноженное на массу и взятое со знаком минус, в сумме дают нуль. Второе слагаемое — произведение ускорения на массу со знаком минус — можно считать силой инерции. Если считать эту силу приложенной к движущемуся телу, то получится, что силы, действующие на тело, уравновешены.

После опубликования трактата д'Аламбера началось быстрое развитие механики систем.

Каждая система характеризуется в данный момент конфигурацией входящих в систему материальных точек. Такую конфигурацию начали рассматривать как точку многомерного пространства. Лагранж в своей «Аналитической механике» дал универсальный метод координатного представления состояний системы и ее движения — метод обобщенных координат — и нашел величину — функцию координат и скоростей, которая является инвариантной при движении системы.

Очень небольшое число научных открытий может быть поставлено в один ряд с методом обобщенных координат по влиянию на стиль и мощь научного мышления. Положение материальной точки в пространстве — исходный образ классической механики — было сопоставлено с конфигурацией системы, рассматриваемой как точка многомерного «пространства». С геометрической точки зрения это было вторым шагом после понятия четырехмерного пространства-времени, которое также вошло в науку благодаря Лагранжу. Когда д'Аламбер в статье «Измерение» в «Энциклопедии»<sup>1</sup> писал о своем «остроумном знакомом»,

<sup>1</sup> Encyclopédie ou dictionnaire raisonné, t. IV, p. 1010. Paris, 1754.

рассматривающем время в качестве четвертого измерения, он мог иметь в виду и Лагранжа и кого-то другого. Но в науку понятие четвертого измерения вошло после того, как Лагранж в «Аналитической механике» изложил основы классической механики в виде аналитической геометрии четырех измерений. Пространство с  $n$  измерениями вошло в науку также благодаря «Аналитической механике». Учение о многомерных пространствах развивалось чисто формальным образом в трудах Коши, Кели, Пюккера, Римана и в особенности в «Учении о протяженности» (1844) Грассмана<sup>1</sup>. Оно обогатило математику новыми мощными методами исследования, позволило реформировать основания геометрии и подготовить плодотворную интерпретацию многомерной геометрии в теории относительности и квантовой механике.

Первым импульсом этого развития была гениальная идея Лагранжа о состоянии механической системы как точке многомерного пространства, идея, давшая толчок дальнейшим формальным построениям математиков. Впрочем, понятие физической идеи здесь не может быть так просто противопоставлено понятию формальных построений. Исторически, во второй половине XVIII и в первой половине XIX в., формальные построения были существенной предпосылкой, а иногда и стороной эмансипации физики от механики и развития понятий механики, вызванного такой эмансипацией.

Лагранж рассматривает систему, состоящую из  $n$  материальных точек. Положения этих точек описываются  $n$  множествами, состоящими каждое из 3 чисел, всего  $3n$  координатами:  $x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots; x_n, y_n, z_n$ . Если каждую координату обозначить через  $q$  с соответствующим значком:  $q_1, q_2, q_3, \dots$ , то конфигурацию системы можно представить точкой  $P$  с  $3n$  координатами  $q_i$ , либо вектором  $q$  с  $3n$  компонентами  $q_i$ . Далее можно представить переход системы из одного положения в другое как смещение точки  $P$  или как  $3n$ -мерный вектор  $dq$  с компонентами  $dq_1, dq_2, \dots$ . Если система движется в трехмерном пространстве, изменение ее положения можно представить в виде  $3n$ -мерной траектории — результирующего смещения точки  $P$ .

<sup>1</sup> См. Ф. Клейн. Лекции о развитии математики в XIX столетии. М.—Л., 1937, стр. 209—221.

В механике Лагранжа обобщенные координаты  $q_i$  могут быть не только декартовыми координатами входящих в систему материальных точек, но и любыми параметрами, описывающими конфигурацию системы. Для системы, в которой на входящие в нее точки действуют силы тяготения и упругие силы, обобщенные координаты определяют в каждый момент действующие на точки силы и, следовательно, ускорения. Скорости тел не влияют на ускорения и могут быть различными при данной конфигурации системы. Если скорости могут быть различными, то при данных ускорениях конфигурация, а значит и силы, в последующий момент могут оказаться неопределенными. Чтобы определить все будущее поведение системы в каждый последующий момент времени, нужно задать для данного момента не только координаты, но и скорости. Эти величины описывают исчерпывающим образом состояние системы.

Понятие состояния теснейшим образом связано с основными посылками классической физики. Напомним о них. Когда из исходной, непосредственно данной картины нерасчлененного хаоса мы выделяем отдельные тела и движения, мы считаем некоторые процессы рядами состояний тождественного себе тела, меняющего свое положение в пространстве. Это и есть исходное представление механики, ее исходный образ — себетождественное тело, меняющее свои координаты в зависимости от времени. Изменение координат не дает оснований усомниться в тождестве движущегося объекта самому себе. Мы «узнаем» тело в каждый следующий момент. Эта основная посылка механики — себетождественность движущегося объекта — гарантируется непрерывным изменением координат. Мы можем утверждать, что перед нами то же самое тело, если принципиально способны зарегистрировать его существование в каждой точке интервала между одним положением и другим. Индивидуальность физического объекта, в данном случае — движущегося тела, гарантируется однозначной зависимостью каждого последующего состояния от данного, т. е. возможностью (также принципиальной) предсказать состояние тела в каждый последующий момент, если известно его состояние в данный момент. Таким образом, понятие состояния обозначает комплекс физических величин, свя-

занный однозначным образом с каждым аналогичным комплексом, относящимся к каждому последующему моменту времени. Из этой непрерывности состояний и их однозначной связи вытекает существование дифференциальных уравнений движения, с помощью которых, зная начальные условия, можно с абсолютной достоверностью предсказать все последующее движение тела. Применяв эти соотношения к системе тел, Лагранж перевел на аналитический язык качественные понятия индивидуальности и себестождественности механической системы, гарантированные непрерывной и однозначной зависимостью ее состояний. Дифференциальные уравнения движения, в которые входят обобщенные координаты  $q$  и обобщенные скорости  $\dot{q} = dq/dt$ , выражают идею классического механического детерминизма.

Перейдем к вопросу о числе обобщенных координат  $q$  (и обобщенных скоростей  $\dot{q}$ ), необходимых для описания состояний системы и, следовательно, для предсказания последующих состояний.

Если система состоит из одной частицы, обобщенные координаты  $q$  совпадают с обычными координатами, т. е. число  $f$  обобщенных координат  $q$  равно трем. Если в системе две частицы, то понадобится шесть обобщенных координат,  $f = 6$ : три обычные координаты первой частицы и три — второй. Если эти две частицы связаны друг с другом неизменным расстоянием (т. е. имеется одно условие связи), достаточно пяти обобщенных координат. Число  $f$  вообще равно числу степеней свободы системы; каждая частица обладает тремя степенями по числу трех измерений пространства, а  $n$  частиц —  $3n$  степенями минус число  $k$  условий связи:

$$f = 3n - k$$

Существует столько же обобщенных скоростей  $\dot{q}$  позволяющих вместе с координатами задать и узнать не только положение системы, но и ее состояние.

С помощью обобщенных координат можно найти уравнения движения для любых систем отсчета. Лагранж получил их, введя функцию  $L(q, \dot{q}, t)$ , равную для консервативных систем разности между кинетической и потенциальной энергиями. Гельмгольц впоследствии назвал эту функцию кинетическим потенциалом.

Кинетический потенциал — лагранжиан  $L$  — позволяет написать уравнения движения в виде:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0.$$

Таких уравнений столько же, сколько степеней свободы у рассматриваемой системы, т. е.  $f = 3n - \kappa$ .

Следующий шаг после введения обобщенных координат  $q_i$  и обобщенных скоростей  $\dot{q}_i$  — введение обобщенных импульсов  $p_i$ . Это частные производные от функции Лагранжа  $L$  по обобщенным скоростям  $\dot{q}_i$ :

$$p_1 = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}, \quad p_2 = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \text{ и т. д.}$$

Величина  $p_i$  называется обобщенным импульсом, потому что в случае декартовых координат ( $q_1 = x$ ,  $q_2 = y$ ,  $q_3 = z$ ) она совпадает с проекцией импульса на соответствующую ось координат. Но она называется обобщенным импульсом, потому что, например, в полярных координатах, где  $q_1 = r$ , а  $q_2 = \varphi$ ,  $p_1$  имеет размерность количества движения, а  $p_2$  — момента количества движения.

С помощью обобщенных импульсов можно получить вместо  $f$  уравнений Лагранжа (второго порядка)  $2f$  уравнений первого порядка. Они принимают особенно простую и симметричную форму, если перейти от функции Лагранжа к функции Гамильтона  $H = T + U$ .

Уравнения Лагранжа и Гамильтона широко применяются в физике, в частности в электродинамике. Но с исторической точки зрения физика получила в этом случае от механики то, что сама ей в свое время дала. Обобщенная форма уравнений движения, где в качестве координат могли фигурировать немеханические параметры, была историческим результатом развития физики.

Воздействие физики привело к модификации исходного принципа механики — принципа относительности.

Возьмем ньютоновы уравнения движения. В них фигурируют чисто механические величины — пространственные координаты материальной точки. Движение такой точки отнесено к некоторой координатной системе, и уравнения движения ковариантны при координатном пре-

образовании, т. е. при переходе от одной инерциальной системы к другой. Теперь возьмем уравнения Лагранжа с обобщенными координатами. Они могут описывать другой, немеханический процесс. Сохраняется ли при этом ковариантность уравнений? Электродинамика Максвелла и затем теория относительности Эйнштейна показали, что уравнения в этом случае ковариантны, если речь идет о системах, движущихся прямолинейно и равномерно. Таким образом, принцип относительности распространяется на немеханические процессы и классическая физика приобретает законченный вид. Правда, она заплатила за это, отказавшись от инвариантных пространственных расстояний и временных интервалов и заменив их инвариантными четырехмерными интервалами. При этом принцип относительности становится общим принципом, объединяющим макроскопическую физику и механику. В этом смысле теория относительности является обобщением классической картины мира. Сохраняют ли при этом законы механики роль основных, исходных, наиболее общих законов, к которым принципы физики не сводятся, но от которых они в то же время неотделимы?

Когда речь идет о разграничении механики и физики, о несводимости физики к механике, вообще об их взаимоотношениях, нужно учитывать историческую изменчивость самих понятий «механика» и «механический». Смысл этих слов меняется, причем меняется в зависимости от физических идей. Каждая из исторических ступеней развития механики отличалась от других своими предельными понятиями, зависевшим от физических концепций, воздействующих на характер механики. Физической предпосылкой механики Декарта было отождествление пространства и вещества. Физические предпосылки механики Ньютона включали представления о силах тяготения, действующих на все тела природы. В механике Лагранжа и Гамильтона физические предпосылки на первый взгляд отсутствуют, механика приобретает формальный характер четырехмерной аналитической геометрии, но это только означает, что при физической интерпретации уравнений входящие в них величины могут быть сопоставлены с различными физическими величинами, связанными законами сохранения. Механика специальной теории относительности связана с новыми физическими

предпосылками — электродинамическими понятиями и закономерностями.

Таким образом, когда мы говорим о механике, к которой сводятся или не сводятся те или иные физические принципы, необходимо учитывать не только ту или иную роль механических понятий в физике, но и обратное воздействие физических понятий на механику. Простое противопоставление «немеханической физики» и «механической физики» игнорирует такое взаимодействие. В действительности связь между физикой и механикой имеет нелинейный характер, и именно с этой точки зрения необходимо рассматривать вопрос о механическом или немеханическом характере релятивистской физики.

Можно ли говорить о «механике» и «механическом» характере физики в целом, заключив в одни скобки все исторические модификации этих понятий? Этот вопрос мы рассматриваем в связи с другим: можно ли говорить о принципе относительности, заключив и здесь в одни скобки все исторические модификации, т. е. говорить о некотором общем понятии относительности, применимом и к классическому принципу Галилея-Ньютона и к специальной и к общей теории относительности Эйнштейна. Принцип Галилея-Ньютона относится к медленным инерционным движениям, специальный принцип относительности — к инерционным движениям, сравнимым по скорости с распространением колебаний электромагнитного поля, общий принцип относительности — к ускоренным движениям материальной точки или системы в гравитационном поле. Во всех случаях речь идет об изменении координат, зависящем тем или иным образом от времени. Во всех случаях речь идет о некотором индивидуализированном, в каждый момент времени локализованном в пространстве физическом объекте, который переходит из одной точки пространства в другую, оставаясь самим собой. Иными словами, рассматриваются последовательные положения себестождественного объекта, через которые он может пройти с любой скоростью (классический принцип относительности) или со скоростью, ограниченной некоторым значением, постоянным (специальная теория относительности), либо зависящим от гравитационных полей — искривлений пространства-времени (общая теория относительности). Независимо от того, какая из этих

концепций принята, понятие о движении себестождественного объекта имеет смысл, если указаны тела, относительно которых он движется. Эти тела отсчета и, соответственно, пространства отсчета равноправны; переход от одного к другому оставляет неизменными некоторые величины (инварианты соответствующих преобразований), т. е. не проявляется в ходе физических процессов внутри движущейся системы. Эксперимент должен показать, на какие преобразования распространяется этот тезис, т. е. можно ли говорить об относительности положений, скоростей и ускорений. Таков смысл принципа относительности, если заключить в одни скобки известные нам релятивистские теории.

Перейдем теперь к обобщению понятия механики. В механике Декарта речь идет о движении тела, которое физически не отличается от окружающего пространства. Декарт пытался идентифицировать и выделить это тело из окружающего пространства, приписывая ему движение относительно соприкасающихся с ним тел. Ньютон приписал движущемуся телу неизменную инертную массу; поэтому он мог игнорировать протяженность тела и рассматривать его как математическую точку — частицу пренебрегаемых размеров, обладающую определенной массой. Уравнения Лагранжа и Гамильтона могут описывать движение более сложного объекта. Его себестождественность и индивидуальность гарантируются неизменностью сложных аналитических выражений. В релятивистской механике возникают значительно более сложные отношения предикатов, идентифицирующих материальную точку. Однако во всех случаях — идет ли речь о частице с массой покоя или о фтоне, у которого основой идентификации служит энергия,— механика в наиболее широком и общем смысле рассматривает относительные движения частицы и системы. В этом смысле каждое релятивистское, координатное представление означает «механическое» представление.

Переходя к конкретным сменявшим и дополнявшим друг друга модификациям принципа относительности и конкретным видам механики, мы можем теперь ответить на вопрос о «механистичности» или «физичности» теории относительности Эйнштейна. Эта теория — механическая теория; но механика, о которой идет речь, сама является результатом длительного воздействия собственно физиче-

ских понятий. Это механика, рассматривающая движение отнюдь не механических в конкретном и узком смысле, а несравненно более сложных физических объектов.

Возможна ли абсолютно «немеханическая» физика, отказывающаяся от механики в самом общем смысле и, следовательно, отказывающаяся от релятивистского, координатного представления физических процессов? Такая физика, по-видимому, невозможна; но возможно и даже вероятно создание физической теории, в которой движение себестожденной частицы и, следовательно, координатное представление будут трактоваться как макроскопические аппроксимации. Об этом говорилось в предыдущей главе, а сейчас мы ограничимся некоторой конкретизацией высказанного предположения — указанием на работы, которые не содержат указанной физической теории, но демонстрируют ее принципиальную возможность. Помимо указанных в предыдущей главе работ Френкеля, упомянем о ряде статей Дирака<sup>1</sup>, в которых основные посылки релятивизма выводятся из квантово-статистических соотношений. Существует несколько более однозначная и разработанная концепция — идея квантования пространства и времени<sup>2</sup>, которая также позволяет представить движение себестожденной частицы как аппроксимацию нетождественных процессов в ряде соседних клеток пространства — времени. Не сопоставимая с указанной концепцией по определенности и широкому применению теория  $S$ -матрицы Гейзенберга, отказывающаяся от гамильтонова формализма, также допускает интерпретацию, при которой релятивизм становится аппроксимацией квантово-статистических соотношений.

Идея квантованного пространства-времени (вместе с другими так или иначе связанными с ней попытками обобщения релятивистской квантовой теории) может служить исходным пунктом исторической оценки механики как основы физики, причем механики в самом широком смысле. Вместе с тем (вернее сказать, — тем самым) кван-

---

<sup>1</sup> «Nature», 168, 906, 1954; Proc. Roy. Soc., A 209, 291, 1951; A 212, 330, 1952; Naturwiss. Rundschau, 6, 11, 441, 1953.

<sup>2</sup> Silberstein. Discrete Space-Time. Toronto, 1936; А. Соколов и Д. Иваненко. Квантовая теория поля. М.—Л., 1952, стр. 593—600.

тованное пространство-время позволяет исторически оценить принцип относительности, взятый в самом широком смысле.

Квантованное пространство — время противоречит не только специальной теории относительности, но и более общему принципу<sup>1</sup>. Метрика дискретного пространства абсолютна, она определяется числом элементарных ячеек; метрика непрерывного пространства зависит от «сил связи», как назвал их Риман, впервые сформулировавший указанную дилемму<sup>2</sup>. Общая теория относительности рассматривает метрику пространства — времени в ее зависимости от гравитационных полей, т. е. от находящихся в пространстве масс. Такой взгляд противоречит концепции абсолютного, квантованного пространства с независимой метрикой. Можно себе представить, однако, что микроскопически абсолютный характер квантованного пространства и времени сочетается с макроскопическим релятивизмом, с зависимостью метрики мира от полей в макроскопических масштабах. Если релятивистские соотношения представляют собой макроскопическую аппроксимацию, то они вместе с механической трактовкой физических процессов становятся объектом исторического анализа, отыскивающего исторические причины и границы применимости данной аппроксимации.

Физическая теория, исходящая из абсолютной точности релятивистских соотношений, не дает отправного пункта для подобной исторической оценки. Релятивистское обобщение классической физики позволяет исторически подойти к принципу относительности Галилея-Ньютона и к механическому истолкованию физических явлений, основанному на законах Ньютона. Но этого недостаточно, чтобы исторически оценить классическую физику в целом. Если классическая физика основана на идее себестождественности движущегося тела, то принцип относительности Эйнштейна является естественным обобщением классического принципа Галилея-Ньютона, выросшим из класси-

---

<sup>1</sup> См. И. Е. Тамм. Вступительное слово на заседании Отделения физико-математических наук Академии наук СССР 30 ноября 1955 г. Сб. «Эйнштейн и современная физика», М., 1956, стр. 91—92.

<sup>2</sup> См. Б. Риман. О гипотезах, лежащих в основании геометрии. «Об основаниях геометрии». Сб. классич. работ, М., 1956, стр. 323—324.

ческой электродинамики, а релятивистская физика XX в. оказывается завершением классической физики.

Квантовая физика была началом новой, неклассической физики, потому что она, широко пользуясь классическими понятиями и образом движущейся в пространстве себестождественной частицы, вместе с тем показала условность этих понятий и этого образа в пределах микромира. По-видимому, дальнейшее развитие основ релятивистской квантовой механики и квантовой электродинамики приведет к единой теории, еще радикальнее отказывающейся от классических понятий и рассматривающей механический образ — движение себестождественной частицы — как закономерную аппроксимацию. Здесь уже речь идет не о переходе от одного принципа относительности к другому, не о переходе от механического объяснения, оперирующего постоянными массами и неограниченными скоростями, к иному более общему и точному механическому объяснению. Речь идет теперь о релятивировании самого релятивизма, об ограничении его (и вместе с тем механического объяснения в физике) макроскопическими масштабами.

---

---

### III. ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ

Принципы относительности и сохранения, соединяющие физику с механикой, в отличие от принципа необратимости, отделяющего физику от механики, имеют длительную предысторию. В какой-то очень частной или, наоборот, общей и расплывчатой форме они были известны в весьма давние времена. Это относится и к вариационным принципам<sup>1</sup>.

Представление о некоторой величине, наименьшее значение которой характеризует течение действительно происходящего процесса, было первоначально высказано применительно к одному частному явлению — отражению света. Герон Александрийский говорил, что закон отражения света можно получить из условия кратчайшего пути. Скорость света при отражении не изменяется, поэтому кратчайший путь соответствует кратчайшему времени. В случае распространения света в неоднородной среде эти условия не совпадают. Требование кратчайшего времени — более общее. Из него можно получить законы преломления. Ферма в 1662 г. вывел их из принципа кратчайшего времени, получившего название принципа Ферма. Если скорость света  $u$  непрерывно меняется на пути между точками  $A$  и  $B$ , принцип Ферма можно выразить как требование наименьшего значения интеграла обратной скорости по пути:

$$\int_A^B \frac{ds}{u}$$

---

<sup>1</sup> См. Л. С. Полак. Вариационные принципы механики, их развитие и некоторые применения в физике (в печати). Дальнейшее изложение истории вариационных принципов опирается на эту рабсту.

В механике принцип, напоминающий принцип Ферма, стал известен в XVIII в. Но впервые он был сформулирован почти одновременно с принципом Ферма. В 1669 г., путешествуя по Италии, Лейбниц написал трактат, посвященный основным проблемам динамики. Трактат был опубликован лишь двести лет спустя<sup>1</sup>. В этом трактате вводится понятие действия («*actio formalis*») — произведения массы, скорости и длины пути. Длина пути равна произведению скорости и времени; поэтому действие можно также определить как произведение массы, квадрата скорости и времени, т. е. как живую силу, умноженную на время. В одном из писем (подлинность его, впрочем, подвергается сомнению) Лейбниц писал, что при движении тела действие остается обычно максимальным или минимальным<sup>2</sup>.

Много лет спустя, в 1744 г., Мопертюи пришел к представлению о наименьшем действии как об универсальной закономерности движения и равновесия. Он писал о «количестве действия», понимая под этим термином произведение массы, скорости и пройденного телом пути. Тело движется так, чтобы действие было минимальным, а равновесия оно достигнет при таком состоянии, когда сообщенное телу малое движение характеризуется минимальным действием. Работа Мопертюи вызвала одну из самых оживленных дискуссий, какие только знало XVIII столетие. Идея однозначной каузальной связи, опиравшаяся на механику Ньютона, вошла к этому времени в арсенал идейной борьбы против догматов религии. И вот в самой механике появляется концепция, выводящая механические закономерности из телеологического принципа или, по крайней мере, из принципа, которому была придана телеологическая форма. Мопертюи придал принципу наименьшего действия не только телеологическую, но и теологическую окраску. Он утверждал, что вся природа, созданная столь целесообразно, может быть объяснена единым принципом целесообразности, доказывающим «мудрость и существование творца». Д'Аламбер ответил Мопертюи рядом статей в «Энциклопедии», Вольтер — остроумным и очень злым памфлетом. В спор ввязалось очень большое число

<sup>1</sup> Leibniz. *Mathematische Schriften*. Herausg. v. Gerhardt, t. II, Bd. II, 1860, S. 345—366.

<sup>2</sup> Leibniz. *Acta Eroditorum*. 1751, t. II, S. 176.

людей. Мыслители, примкнувшие к энциклопедистам, высмеивали телеологическую концепцию Мопертюи. Эйлер, вообще говоря не склонный вводить религиозные мотивы в трактовку научных проблем, здесь выступил как защитник религии против свободомыслия и участвовал в идейной борьбе на стороне Мопертюи, правда с некоторыми оговорками. Однако подлинный смысл работ Мопертюи и появившихся вскоре еще более глубоких и изящных исследований Эйлера, в которых был сформулирован закон наименьшего действия, вскоре прорвал первоначальную религиозно-апологетическую и телеологическую оболочку.

Эйлер, отчасти поддерживавший Мопертюи в его теологических упражнениях, сделал в то же время очень многое, чтобы лишить принцип наименьшего действия телеологической окраски. Таков был объективный результат математизации принципа, которую он претерпел в руках Эйлера. Исследования, приведшие Эйлера к принципу наименьшего действия, связаны с созданием вариационного исчисления.

Для генезиса вариационного исчисления особенно большое значение приобрела поставленная и решенная в 1696 г. Иоганном Бернулли задача о брахистохроне или линии наискорейшего спуска. Между точками  $M_1$  и  $M_2$  можно провести бесконечное число кривых. Одна из кривых обладает тем свойством, что материальная частица, двигаясь под влиянием своей тяжести из  $M_1$  в  $M_2$  вдоль этой кривой, достигает последнего пункта скорее, чем при движении вдоль любой другой кривой. Каждая кривая, проходящая через  $M_1$  и  $M_2$ , соответствует непрерывной и непрерывно дифференцируемой функции  $y = f(x)$ . Время, в течение которого материальная частица под влиянием своей тяжести перейдет из  $M_1$  в  $M_2$ , равно некоторому интегралу  $T$ . Из всех возможных функций  $f(x)$  нужно выбрать такую, чтобы интеграл  $T$  имел наименьшее значение.

Решая задачу о брахистохроне, Бернулли одновременно указал общий метод решения аналогичных задач. Среди них была так называемая изопериметрическая задача, в которой требовалось найти вид замкнутой кривой, ограничивающей наибольшую или наименьшую площадь, причем длина кривой остается неизменной. При этом Бернулли сформулировал принцип, согласно которому, если кривая дает максимум или минимум, то этим же свойством

обладает и каждая бесконечно малая часть кривой. Этот принцип не имеет общего значения; в ряде случаев элементы кривой не обладают указанным свойством. Но имея в виду случаи, когда принцип, выдвинутый Бернулли, оправдывается, Эйлер сделал существенно важный шаг в формулировке принципа наименьшего действия. Мопертюи рассматривал весь путь, пройденный телом; Эйлер, имея в виду, что элементы пути также дают максимум или минимум действия, рассматривал такие элементы и вставлял в свои уравнения вместо конечного пути  $S$  элемент пути  $ds$ .

В 1697 г. Иоганн Бернулли выдвинул еще одну задачу, состоящую в отыскании минимума. Нужно было провести между двумя заданными точками кратчайшую линию на произвольной поверхности. Решая эту задачу, Бернулли пришел к важным результатам в определении геодезических линий. Он предложил Эйлеру заняться указанной проблемой. С конца двадцатых и в течение тридцатых годов Эйлер неоднократно возвращался к работам в области вариационного исчисления. В 1744 г. появилась известная книга Эйлера «Метод нахождения кривых линий, обладающих свойствами максимума или минимума, или решение изопериметрической задачи, взятой в самом широком смысле»<sup>1</sup>. В приложении Эйлер поместил небольшую работу «Об определении движения брошенных тел в несопротивляющейся среде методами максимумов и минимумов». В этой работе показано, что тело, двигаясь под действием центральных сил из точки  $A$  в точку  $B$  со скоростью  $v$ , описывает траекторию, которой соответствует минимальное или максимальное значение интеграла

$$\int m \mathbf{v} ds.$$

Эйлер отметил, что сформулированный им принцип может быть применен лишь в тех случаях, когда применим закон живых сил. Мопертюи, напротив, считал принцип наименьшего количества действия более широким, чем закон живых сил. Однако в работах Эйлера принцип наименьшего действия приобрел более общий характер, чем у Мопертюи. Мопертюи рассматривал лишь конечные и

<sup>1</sup> Эта книга издана в русском переводе в 1934 г. (ГТТИ).

прерывные изменения скорости. Напротив, Эйлер из принципа наименьшего действия мог получить дифференциальные уравнения траектории и таким образом применить принцип к непрерывным движениям. Вообще после работ Эйлера исследования Мопертюи сохранили лишь историческое значение, да и то не слишком большое. Эйлер решил ряд задач о движении брошенного тела, последовательно усложняя условия задач, рассматривая сначала однородное поле тяжести, затем поле, являющееся функцией высоты, действие на тело двух перпендикулярно направленных сил и т. д. Общий вывод Эйлера состоит в универсальном значении принципа наименьшего действия для движения брошенных тел при отсутствии сопротивления среды. Принцип относится не только к отдельному телу, но и к системе нескольких тел.

Эта идея Эйлера получила полное развитие у его младшего современника Лагранжа. Превратив механику в чисто аналитическую дисциплину, Лагранж придал ей поразительное математическое изящество. Здесь следует остановиться на содержании и значении этого понятия. Изящество заключается в общности решений. Но критерий изящества далеко не всегда является основным для математического естествознания; недаром Больцман советовал «оставить изящество портным и сапожникам». В механике критерий изящества играл особенно большую историческую роль в период, когда механика создавала формальный аппарат для законов, выходявших за рамки самой механики. Тогда математическое изящество, общность, отсутствие механических и геометрических представлений позволяли распространить установленные аналитические соотношения на новый круг явлений.

Уже в 1760—1761 гг. в двух статьях, посвященных принципу наименьшего действия, Лагранж обобщил результаты Эйлера. Несмотря на замечания Эйлера о возможности распространить принцип на несколько точек, в его работах принцип был сформулирован лишь для одной материальной точки. Лагранж обобщил этот принцип на произвольную систему  $n$  точек с массами  $m_i$ , произвольным образом действующих друг на друга и находящихся под действием центральных сил, пропорциональных произвольным степеням расстояний. В этом случае движение

системы определяется требованием наименьшего или наибольшего значения суммы

$$\sum_{i=1}^n m_i \int v_i ds_i.$$

Очень важным и плодотворным было введенное Лагранжем понятие изоэнергетической вариации. Сущность дела состоит в том, что Лагранж выводит принцип наименьшего действия из принципа сохранения живых сил. Он сравнивает траектории, соединяющие точки  $A$  и  $B$ , удовлетворяющие требованию постоянства энергии ( $E = \text{const}$ ), и приходит к утверждению, что из таких траекторий истинной будет траектория, соответствующая минимуму величины:

$$S = \int_A^B m v ds.$$

В общем случае пространственные пути между  $A$  и  $B$  при одной и той же полной энергии  $E = T + U$  частицы будут пройдены в неравные промежутки времени. Потенциальная энергия  $U$  в различных точках пространства, вообще говоря, не одна и та же; следовательно, при постоянстве полной энергии  $E$  должна меняться кинетическая энергия  $T$ , а значит, и скорость частицы. Неодинаковая скорость означает неодинаковые промежутки времени, необходимые для перемещения частицы из  $A$  в  $B$ . Если же на материальную точку не действует сила, задача состоит в определении пространственного пути, по которому при постоянной скорости частица переходит из  $A$  в  $B$  в кратчайшее время. Таким путем будет прямая линия.

Принцип наименьшего действия в форме, которую ему придал Лагранж, можно рассматривать как исходный принцип механики. Он не только ограничивает движение точки и системы точек требованием сохранения некоторого интеграла, но и указывает однозначным образом, каково будет действительное движение точки или системы при заданных начальных условиях.

Принцип сохранения энергии указывает, какие движения возможны. Он позволяет получить одно уравнение в каждом случае движения тела. Но одно уравнение не определяет однозначно действительное движение. Для этого необходимо столько уравнений, сколько независимых ко-

ординат характеризует движение: для определения движения свободной точки нужно, например, три уравнения. Принцип наименьшего действия дает необходимое число уравнений. Задачи, в которых заданы наибольшее и наименьшее значения, дают для каждой независимой координаты особое уравнение.

Принцип наименьшего действия отличается от других вариационных принципов интегральным характером. В нем рассматриваются не дифференциальные свойства движения (скорость в данной точке и т. д.), характеризующие движение в каждой точке, а свойство, характеризующее движение на конечном отрезке, измеряемое интегралом по пути.

Отсюда следует возможность не включать в формулировку вариационной задачи координаты точки. Отрезок по своей величине не зависит от координат точек и является инвариантом координатных преобразований. Поэтому принцип наименьшего действия характеризует движение независимо от выбора той или иной системы координат.

Таков был характер принципа наименьшего действия уже у Мопертюи и Эйлера. Но у них не было ясного понимания роли начальных условий для однозначного определения движения точки или системы. В форме, которую придал принципу наименьшего действия Лагранж, значение их полностью выяснено.

Лагранж считал принцип наименьшего действия простым выводом из уравнений динамики и выступал против представления о нем как об универсальном принципе мироздания. Это связано с враждебным отношением Лагранжа к априорным конструкциям. Лагранж относился к механике и особенно к принципу наименьшего действия так же, как он относился к основаниям дифференциального исчисления. Маркс говорил о Лагранже: «...поскольку дело касается чистого анализа, Лагранж действительно отделался от всего того, что ему представляется метафизической трансцендентностью в ньютоновых флюксиях, лейбницеvских бесконечно-малых различных порядков, в теории предельных значений исчезающих величин, в существовании  $0/0 = dy/dx$  как символа дифференциального коэффициента»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> «Из математических рукописей Маркса». Сб. Марксизм и естествознание, стр. 155.

Лагранж окончательно отбросил метафизическое понимание принципа наименьшего действия и трактовал его как чисто механический, а так как механика у Лагранжа — это только особый класс задач вариационного исчисления, то принцип как бы полностью формализовался. Формализация принципа была условием расширения его физического содержания. В этом, как сказано выше, состояла вообще историческая роль понятий и методов аналитической механики Лагранжа — в первую очередь метода обобщенных координат. Указанный метод — основной метод Лагранжа — и наименьшее действие — основное понятие аналитической механики — приобрели столь обобщенный вид, что оставался один шаг до того, чтобы превратить принцип наименьшего действия из механического в физический, так же как метод обобщенных координат из метода механики в метод физики<sup>1</sup>.

Этот шаг был сделан Гамильтоном и другими механиками XIX в. Мы не будем касаться научной биографии Гамильтона, но об одном обстоятельстве следует упомянуть. Исходным пунктом исследований, приведших Гамильтона к открытию новой формы вариационного принципа механики, были оптические проблемы. Уже в работе Мопертюи видно воздействие оптических исследований на развитие механики, приведшее к обобщению, которое могло быть впоследствии распространено на несводимые к механике физические процессы. В работах Лагранжа нет таких «онтогенетических» доказательств зависимости механики от собственно физических, в данном случае оптических, исследований. У Гамильтона же мы сталкиваемся со связью оптики и механики в самом творческом пути ученого. Первый цикл исследований Гамильтона был посвящен оптике и привел к предсказанию конической рефракции, предсказанию, экспериментально подтвердившемуся и служащему наряду с открытиями Нептуна и новых элементов, предсказанных Менделеевым, классическим примером научного предвидения. В своих работах по геометрической оптике Гамильтон стремился получить функцию, которая полностью характеризовала бы каждую оптическую систему. Об этой функции Гамильтон писал, что

---

<sup>1</sup> См. Л. С. Полак. Вариационные принципы механики, их развитие и некоторое применение в физике.

она «представлялась в другой связи, прежним авторам ражением результата весьма высокой и обширной инд~~у~~ции... Результат этот известен и обычно называется законом наименьшего действия, иногда — принципом наименьшего времени, и включает в себе все, что было до сих пор открыто в отношении правил, определяющих форму и положения линий, по которым распространяется свет, и изменений направления этих линий, вызываемых отражением либо преломлением, обычным или необычным. Некоторое количество, являющееся в одной теории действием, а в другой — временем, затрачиваемым светом при переходе от одной точки к любой другой, оказывается меньшим, если свет идет своим фактическим путем, а не каким-нибудь иным или, по крайней мере, имеет то, что технически называется вариацией, равной нулю»<sup>1</sup>.

Таким образом, уже здесь Гамильтон указывает на близкую связь принципов наименьшего действия в механике и наименьшего времени распространения света в оптике.

Исходя из принципа Ферма, Гамильтон рассматривает функцию, полностью характеризующую оптическую систему:

$$V = \int_A^B v ds,$$

где

$$A(x_0, y_0, z_0) \text{ и } B(x_k, y_k, z_k)$$

граничные точки. Определив функцию  $V$  из требования

$$\delta V = 0,$$

Гамильтон представляет ее как функцию граничных точек и находит уравнения, показывающие зависимость направляющих косинусов луча от координат граничных точек. Эти уравнения аналогичны лагранжевым уравнениям в механике, причем функция  $V$  соответствует интегралу действия.

Далее Гамильтон показывает, что геометрическая оптика может пользоваться одними и теми же аналитическими понятиями независимо от волновой или корпускулярной картины распространения света. И корпускулярные и

<sup>1</sup> Цит. по Л. С. Полаку. Вариационные принципы, гл. III.

волновые воззрения приводят для большого круга проблем к одним и тем же результатам при определении геометрических свойств лучей. Луч света может рассматриваться как перпендикуляр к некоторой волновой поверхности и как траектория световой частицы; но при переходе от одного воззрения к другому математический аппарат не меняется. Именно это обстоятельство и явилось основой той глубокой аналогии между механическими и оптическими процессами, которая была указана Гамильтоном и впоследствии сыграла важную роль при создании новых физических теорий.

В тридцатые годы Гамильтон переходит к систематическому применению вариационного принципа к проблемам динамики. Первая работа была написана в 1833 г. Гамильтон назвал ее «Проблема трех тел, рассмотренная с помощью моей характеристической функции». После нее появился ряд других. Изложенный в этих работах вариационный принцип, вообще говоря, отличается от принципа наименьшего действия. Согласно принципу Гамильтона уже не интеграл по пути от количества движения, а иная величина своим наименьшим (или наибольшим) значением характеризует истинный путь частицы. Это — интеграл по времени от функции Лагранжа. Сравняются различные пути частицы, согласующиеся со связями, соединяющие две пространственные точки — положения частицы, — проходимые в заданное время: в момент  $t_0$  частица находится в первой точке, а в момент  $t_1$  — во второй. Интеграл от функции Лагранжа

$$W = \int_{t_0}^{t_1} L dt$$

для истинного пути будет наименьшим либо наибольшим. Таким образом, здесь в отличие от принципа наименьшего действия снимается требование постоянства энергии вдоль сравниваемых путей; а под знаком интеграла стоит иная функция. Величина  $W$  может быть не только наименьшей, но также и наибольшей, в то время как

$$S = \int_A^B mv ds$$

по истинному пути имеет минимальное значение.

Функция Лагранжа  $L$  в случае, когда система консервативна, равна разности кинетической и потенциальной энергии:  $L = T - U$ . В этом случае принцип Гамильтона совпадает с принципом наименьшего действия.

Переход от изоэнергетической вариации интеграла к новому вариационному принципу, требующему для действительного движения нулевого значения вариации интеграла функции Лагранжа по времени, имел первостепенное историческое значение. Если варьируется энергия в некоторый промежуток времени, то можно не только исключить координаты точек  $A$  и  $B$ , но и не предполагать вообще перехода частицы из одной точки пространства в другую. Иначе говоря, можно отнести вариационный принцип не только к механическому процессу.

Такое существенное обобщение основного принципа механики могло быть, разумеется, использовано для телеологических выводов. Но сам Гамильтон не был в этом повинен. Подобно Лагранжу он стремился придать интегральному вариационному принципу механики возможно более строгий, формально-математический вид. Он выступает против телеологического принципа «экономии природы». «Хотя закон наименьшего действия,— пишет Гамильтон,— стал таким образом в ряд высочайших теорем физики, все же его претензии на космогоническую необходимость на основе экономии во Вселенной в настоящее время обычно отвергаются»<sup>1</sup>.

Вместе с тем Гамильтон считал принцип наименьшего действия чрезвычайно широким, относящимся не только к оптике и динамике, но и ко всей физике. В одном из писем Гамильтона говорится о единой теории, охватывающей все основные проблемы физики и выводящей их решения из принципа наименьшего действия. Построение такой теории — дело будущего. «В настоящее время было бы безрассудно пытаться приступить к такой обширной теме, объединяющей наиболее важные физические явления... Уместно отметить,— продолжает Гамильтон,— что этот динамический принцип является только другой формой идеи, примененной уже мною к оптике»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Hamilton. On a general method of Expressing of the Paths of light and of the Planet by the coefficients of a Characteristic Functions. Math. Pap., v. I, p. 314.

<sup>2</sup> См. Whittaker. Analytische Dynamik der Punkte und starren Körper. Berlin, 1924, S. 323.

Возможность действительно строгого вывода законов физики из принципа наименьшего действия требует освобождения его от априорной физической и тем более метафизической интерпретации. «Мои собственные исследования по динамике,— говорит Гамильтон,— лежат в совершенно ином направлении, они приводят меня к системе строгих и общих выражений для интегралов дифференциальных уравнений движения системы материальных точек»<sup>1</sup>.

Дальнейшая формализация принципа наименьшего действия была произведена Якоби в тридцатые годы XIX в. Якоби придал принципу новую форму. Для одной частицы с массой  $m$  новая форма у принципа Гамильтона получается очень просто. Якоби умножает удвоенную кинетическую энергию  $T$  частицы на квадрат элемента времени  $dt$ . Удвоенную кинетическую энергию можно считать произведением массы частицы и квадрата ее скорости:

$$2T = mv^2 = m \left( \frac{ds}{dt} \right)^2,$$

где  $ds$  — элемент длины, траектории частицы. Умножив эту величину на  $dt^2$ , получаем:

$$2T dt^2 = \sqrt{2T} \sqrt{2T dt^2} = \sqrt{2Tm} ds.$$

В формуле принципа наименьшего действия под знаком интеграла стоит действие — энергия, помноженная на время. Мы можем представить принцип наименьшего действия в форме:

$$\delta A = \delta \int_{t_1}^{t_2} 2T dt = 0$$

и заменить подинтегральное выражение новым:

$$\delta A = \delta \int_{s_1}^{s_2} \sqrt{2Tm} ds = 0.$$

В этом случае интегрирование ведется не по времени, а по пути. Если силы консервативны и кинетическая энергия  $T$  равна разности полной энергии  $E$  и потенциальной энер-

<sup>1</sup> Цит. по Л. С. Полаку. Вариационные принципы, гл. III.

гии  $U$ , то написанное условие можно заменить другим:

$$\delta A = \delta \int_{s_1}^{s_2} \sqrt{2m(E - U)} ds = 0.$$

В этой форме Якоби представил принцип наименьшего действия для одной частицы. Его можно обобщить для системы. Здесь существенно, что интеграл берется не по времени, а по пути. Для одной частицы путь, соответствующий наименьшему действию, представляет собой определенную линию в трехмерном пространстве. Для системы мы можем представить действительное движение как траекторию в многомерном пространстве.

Возьмем частицу, движущуюся по некоторой поверхности по инерции. Частица находится под действием уравновешивающих друг друга центробежной силы и силы реакции. Обе эти силы не имеют тангенциальных слагающих, так что частица сохранит абсолютную величину скорости: она будет двигаться с неизменной скоростью по геодезической линии.

Задача сводится к отысканию геодезической линии. Таким образом, вариационный принцип получил в еще большей степени формально-математическую, а именно геометрическую форму, которая, как мы увидим дальше, окажется весьма плодотворной. Следует сказать несколько слов об историческом значении последовательной формализации вариационного принципа.

Она имела прогрессивный исторический смысл в двойном отношении. Во-первых, к Гамильтону и Якоби относится все сказанное о Лагранже. Когда механика вплотную подходит к физическим закономерностям, когда в механике готовится аппарат, применимый не только к ней, но и к другим областям, одной из существенных сторон подготовки становится такое представление динамических закономерностей, в котором наглядная механическая интерпретация исчезает. Метод обобщенных координат и принцип наименьшего действия превращаются из механических, обобщающих закономерности движения в собственно механическом смысле, в метод и принцип физики. Выше говорилось, что предпосылкой такого обобщения закономерностей механики были, с одной стороны, математика, ответы которой всегда шире заданных ей вопро-

сов, и, с другой стороны, — философское обобщение механики XVII—XVIII вв. Когда механический принцип наименьшего действия в работах Гамильтона получил дальнейшее развитие в обобщенной и изящной математической форме, это значило, что он становится в потенции физическим принципом. Иманентные силы развития математики, ее «свободный пробег» после импульса, полученного от запросов механики, вели науку вперед к такому аппарату, который мог получить уже не механическую, а физическую интерпретацию. В этом прежде всего состоит прогрессивный исторический смысл работ Гамильтона и Якоби, посвященных принципу наименьшего действия.

Вторая сторона дела — философское обобщение механических понятий. Наряду с метафизическим абсолютизированием исторически ограниченных тенденций, в развивающейся науке существовали действительные обобщения тех направлений, которые как раз и состояли в расширении и модификации первоначальных схем. Такие обобщения были стихийными, пока конкретные перипетии классовой борьбы (в частности, отпор распространению псевдосоциалистических идейных суррогатов в рабочем движении) не сделали диалектическое обобщение естествознания очередной задачей марксизма, пока в «Анти-Дюринге» эта задача не была решена. Но и в стихийной форме антиметафизические мотивы в мировоззрении передовых естествоиспытателей XVIII—XIX вв. имели существенное значение для развития науки. Лагранж — предполагаемый автор «Системы природы», называвший Босковича «иезуитом, которого нужно сжечь», высмеивавший теологические упражнения Эйлера в «Письмах к немецкой принцессе», сознательно занимал антиметафизическую позицию в идейных спорах XVIII в. и сознательно стремился лишить принцип наименьшего действия его метафизической окраски. Гамильтон и Якоби делали это стихийным образом. В их время рассуждения о «целесообразно действующей природе» хотя и неоднократно повторялись, но уже выглядели анахронизмом. Так или иначе, формализация принципа и в XIX в. означала его освобождение от метафизической традиции, начатой Мопертюи.

Якоби очень точно охарактеризовал значение принципа наименьшего действия. Оно состоит прежде всего в связи принципа с дифференциальными уравнениями Ла-

граница и «...заключается, во-первых, в форме, в которой он представляет дифференциальные уравнения динамики и, во-вторых, в том, что он дает такую функцию, которая имеет минимум, когда эти дифференциальные уравнения удовлетворяются»<sup>1</sup>.

Вместе с тем Якоби говорит, что при таком рациональном истолковании принципа, т. е. при констатации его связи с дифференциальными уравнениями динамики, не остается места для «метафизической причины» принципа.

После работ Гамильтона и Якоби новый существенный шаг в развитии принципа сделал М. В. Остроградский<sup>2</sup>. В 1848 г. в докладе на собрании Петербургской Академии наук он вывел принцип наименьшего действия из более общих условий, чем это сделал Гамильтон. Гамильтон предполагал, что система, подчиненная принципу наименьшего действия, будучи несвободной, ограничена условием, что ее кинетическая энергия — однородная функция второго порядка от обобщенных скоростей. Отсюда вытекает предположение о стационарности связей. Остроградский в своей работе 1848 г. рассматривал принцип наименьшего действия без указанных условий.

Во второй половине XIX в. в результате работ Софуса Ли и других математиков (для которых, как и для Остроградского, проблемы динамики представлялись частным случаем более общих, собственно математических проблем теории дифференциальных уравнений и вариационного исчисления) был создан стройный и детально разработанный аппарат механики Гамильтона — Якоби. Самое главное в этом аппарате — связь вариационного принципа с теорией особых преобразований, так называемых «касательных преобразований». Эти преобразования могут быть интерпретированы геометрически как изменения некоторой поверхности, а при дальнейшей, уже физической конкретизации как изменения поверхности равного действия. С другой стороны, вариационный принцип интерпретируется как закон движения материальной точки или системы материальных точек. Сближение двух физических образов — движения тела по определенной

<sup>1</sup> Якоби. Лекции по динамике. М.—Л., 1936, стр. 44.

<sup>2</sup> M. Ostrogradski. Mémoire sur les équations, différentielles relatives au problèmes isopérimètres. Mém. d. l'Acad. d. Sc. St.-Petersb., 1850, p. 385—517.

траектории и распространения некоторой поверхности — вплотную подвело науку к проблеме объединения теории волнового процесса и теории движения дискретного тела. Эти теории были объединены в неклассической концепции — волновой механике в двадцатые годы нашего века. Здесь как на ладони видна роль математического обобщения классической физики в подготовке неклассической теории.

Переход от собственно механической интерпретации принципа Гамильтона к более общему его пониманию, подготавливавшему неклассические концепции, происходил по большей части стихийным образом. Гельмгольц, мыслитель, стремившийся свести физические процессы к их механическому субстрату, понимавший принцип наименьшего действия в чисто механическом смысле, в 1886 г. систематически применил этот принцип к проблемам механики, термодинамики и электродинамики. Он ввел понятие кинетического потенциала, способствовавшее обобщению физической интерпретации принципа. Кинетический потенциал — это величина, из которой можно получить действие путем интегрирования по времени. Эта величина фигурировала в различных областях физики без какой-либо механической интерпретации. В трудах Гельмгольца кинетический потенциал трактовался не как производная величина — разность между кинетической и потенциальной энергией, а как исходная величина. Это было важным шагом для перехода к немеханическому пониманию принципа наименьшего действия, так как кинетический потенциал может отличаться от механического понятия разности  $T - U$ . Вне механики, где различие между кинетической и потенциальной энергией теряет непосредственный смысл, кинетический потенциал нельзя получить однозначным образом при заданной энергии. Поэтому самостоятельный характер понятия кинетического потенциала позволяет сделать принцип наименьшего действия универсальным принципом физики обратимых процессов, не сводя ее законы к законам механики, иными словами — позволяет трактовать указанный принцип уже не как механический.

Излагая приведенные соображения и ссылаясь на применение принципа Гамильтона в электродинамике без каких-либо механических моделей, Планк пишет, что прин-

цип наименьшего действия прошел тот же путь, что и принцип сохранения энергии. «Последний также считался первое время механическим принципом, а общее значение его приводилось в качестве доказательства механического мировоззрения. В настоящее время механическое мировоззрение сильно поколебалось, но никто не станет серьезно сомневаться в общности принципа сохранения энергии. Если рассматривать теперь принцип наименьшего действия как чисто механический принцип, то пришлось бы впасть в такую же односторонность<sup>1</sup>».

Обобщение принципа наименьшего действия происходило в форме электродинамических и термодинамических концепций, которые, начиная с работ Гельмгольца, опирались на принцип Гамильтона. Другой, менее явной формой такого обобщения была математическая разработка принципа.

В истории вариационных принципов мы встречаемся с именем Гаусса. Гаусс, быть может больше чем кто-либо другой, отразил в своих математических, механических и физических идеях характерные черты науки XIX в., порвавшей с прямолинейным рационализмом предыдущего столетия и подготавливавшей неклассическую физику XX в. Это относится к основным работам Гаусса, но, пожалуй, еще больше — к тем отрывочным записям, которые были найдены впоследствии в письмах, дневнике, в беглых заметках на полях прочитанной книги. Подобное, казалось бы чисто биографическое, обстоятельство иллюстрирует некоторую общую черту жизни и мировоззрения ряда мыслителей первой половины XIX в. Мощный идейный порыв, давший такие бессмертные образцы диалектической мысли, как «Фауст», «Энциклопедия философских наук» и, не столь явные, но не менее плодотворные взлеты «нелинейного» мышления в математике и естествознании, весь этот идейный порыв в последнем счете был результатом промышленной, социальной и политической революции, пронесшейся в конце XVIII в. по всей Европе и достигшей наибольшей остроты в якобинской диктатуре. За пределами Франции влияние революции было косвенным и неявным. «Немецкая теория французской революции» — философский метод Гегеля — сочеталась с очень мирным

---

<sup>1</sup> М. П л а н к. Физические очерки. М., 1925, стр. 95.

политическим выводом. Энгельс писал, что «...специфической формой этого вывода мы обязаны тому обстоятельству, что Гегель был немец и, подобно своему современнику Гете, порядочный филистер. Гегель, как и Гете, был в своей области настоящий Зевс-олимпиец, но ни тот ни другой не могли вполне отделаться от духа немецкого филистерства»<sup>1</sup>. К этим двум именам можно было бы прибавить имя Гаусса, в биографии которого таким характерным образом переплетаются смелые обобщения математического Зевса с филистерским благоразумием, заставлявшим геттингенского профессора из страха перед «криком беотийцев» молчать о наиболее революционных математических и механических замыслах.

В 1829 г. в статье «О новом общем начале механики» Гаусс выдвинул в качестве такого наиболее общего начала утверждение: система со связями, без трения, находясь под действием любых сил, движется таким образом, что принуждение со стороны связей и давление на связи имеет наименьшее значение.

Гаусс излагает принцип наименьшего принуждения следующим образом.

«Движение системы материальных точек, связанных между собой произвольным образом и подверженных любым влияниям, в каждое мгновение происходит в наиболее совершенном, какое только возможно, согласии с тем движением, каким обладали бы эти точки, если бы все они стали свободными, т. е. оно происходит с наименьшим возможным принуждением, если в качестве меры принуждения, примененного в течение бесконечно малого мгновения, принять сумму произведений массы каждой точки на квадрат величины ее отклонения от того положения, которое она заняла бы, если бы была свободна»<sup>2</sup>.

Обозначив такую сумму через  $Z$  и рассматривая систему  $n$  точек, можно написать

$$Z = \sum_{k=1}^{3n} m_k \left( \ddot{x}_k - \frac{X_k}{m_k} \right)^2.$$

<sup>1</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. XIV, стр. 639.

<sup>2</sup> См. русск. пер. статьи Гаусса в примечании к «Аналитической механике» Лагранжа. Т. II. М.—Л., 1950, стр. 412.

Если бы внутренних связей не было, величина, стоящая в скобках, равнялась бы нулю, так как при этом

$$\ddot{x}_k = \frac{X_k}{m_k}.$$

Ненулевая величина разности, стоящей в скобках, свидетельствует об отклонении движения частицы от свободного движения, т. е. о результате принуждения со стороны внутренних связей. Указанную разность можно назвать потерянной силой, деленной на массу. Напомним, что «потерянной силой» д'Аламбер называл ту часть действующей на систему силы, которая не влияет на движение входящих в систему частиц. Обозначим потерянную силу через  $F_k$ . Тогда

$$Z = \sum_{k=1}^{3n} \frac{1}{m_k} F_k^2.$$

В этой форме мера принуждения напоминает выражение, фигурирующее в гауссовом методе наименьших квадратов.

Напомним читателю, что в 1795 г., восемнадцати лет от роду, Гаусс открыл, а в 1818 г. сделал известным этот метод, позволяющий по ряду измерений, содержащих случайные ошибки, найти величину, наименее отличающуюся от истинной<sup>1</sup>. В самых простых случаях оценки измеряемых величин, сделанные с помощью метода наименьших квадратов, являются линейными функциями значений, полученных при измерениях. Если ошибки при этих измерениях случайны, независимы и подчиняются нормальному распределению, метод наименьших квадратов позволяет оценить неизвестную величину с наименьшей средней квадратичной ошибкой. Обозначив через  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) значения, полученные в  $n$  независимых измерениях, произведенных для определения величины  $x$ , а через  $p_i$  — вес произведенного измерения, можно принять в качестве

---

<sup>1</sup> Ф. Клейн. Лекции о развитии математики в XIX столетии. М.—Л., 1937, стр. 61; А. С. Чеботарев. Способ наименьших квадратов с основами теории вероятностей. М., 1936; Н. И. Идельсон. Способ наименьших квадратов и теория математической обработки наблюдений. М., 1947.

оценки величины  $x$  значение  $X$ , для которого окажется наименьшей сумма квадратов:

$$\sum_{i=1}^n p_i (y - X)^2.$$

Если сопоставить с этим выражением гауссову меру принуждения, то обратная масса будет соответствовать статистическому весу, а потерянная сила  $F$  — ошибке.

Соответствие между общим принципом механики, с одной стороны, и одним из основных соотношений теории ошибок — методом наименьших квадратов, — с другой, это соответствие уже Гауссу казалось многозначительным. Статья о принципе наименьшего принуждения заканчивается словами: «Весьма примечательно, что когда свободные движения несовместимы с природой системы, то они изменяются совершенно так же, как геометры при своих исчислениях изменяют выводы, полученные ими непосредственно, применяя к ним метод наименьших квадратов, с тем чтобы сделать эти выводы совместимыми с необходимыми условиями, предписанными природой вопроса»<sup>1</sup>.

Отметив такое соответствие, Гаусс не сообщил, в каком направлении шла дальше его мысль, почему и в каком смысле «весьма примечательным» казалась ему указанная параллель. Быть может, здесь, как и в ряде других случаев, Гаусс не развивал или, по крайней мере, не решался опубликовать наиболее радикальные концепции. Трудно судить, не сказалась ли и в рассматриваемом случае боязнь «крика беотийцев».

Однако независимо от подобных соображений физическая интерпретация соответствия между принципом наименьшего принуждения и методом наименьших квадратов была так же невозможна в двадцатые — тридцатые годы XIX в., как и физическая интерпретация, например, неэвклидовой геометрии. Если аналогия между методом наименьших квадратов и принципом наименьшего принуждения представляет собой нечто большее, чем просто аналогию, то само отличие истинного движения частицы от возможных принимает статистический характер. Воздействие внутренних связей сказывается в большом числе

---

<sup>1</sup> Цит. по «Аналитической механике» Лагранжа (см. сноску на стр. 62).

отклонений частицы от свободного движения, подобно тому как различные игнорируемые в макроскопическом представлении причины вызывают множество погрешностей наблюдения. Изменение движения частицы под воздействием связей приобретает вид статистической закономерности. Представить движение частицы по определенному пути как статистически выравниваемый результат большого числа элементарных воздействий можно было только на основе релятивирования себестоимости частицы. Но до этого было еще далеко, больше ста лет.

Вернемся, однако, к принципу наименьшего принуждения.

Этот принцип требует, чтобы величина  $Z$ , выражение которой написано выше, была наименьшей, чтобы ее вариация  $\delta Z$  была равна нулю. Вариация оставляет неизменными положения  $x_k$  и скорости  $\dot{x}_k$  каждой  $k$ -й частицы условия связи, действующие на систему, и массы  $m_k$  частиц. Варьируются ускорения  $\ddot{x}$ . Из этих условий можно получить уравнения Лагранжа для системы частиц. Следовательно, принцип наименьшего принуждения подобно принципу д'Аламбера позволяет получить уравнения движения и в этом смысле может служить исходным принципом механики. Подобно принципу д'Аламбера, он является дифференциальным принципом: рассматриваются не будущее и прошлое системы, а только ее состояние в данный момент. Это состояние определяет дальнейшее поведение системы. Таким образом, здесь нет противоречащей механическому детерминизму Лагранжа и Лапласа зависимости состояния системы от всего ее поведения в некотором пространственном или временном интервале, зависимости, на которую указывают интегральные принципы механики: принцип Мопертюи и принцип Гамильтона.

Развитием идеи Гаусса был принцип прямейшего пути, выдвинутый в 1892—1893 гг. Герцом. Этот принцип продолжает вместе с тем линию Якоби — геометризацию вариационного принципа и динамики в целом. Он сформулирован в связи с известной попыткой Герца построить механику без понятия сил. Попытка эта сделана в книге «Принципы механики» (1892) <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> H. Hertz. Die Prinzipien der Mechanik in neuen Zusammenhänge dargestellt. Gesam. Werke, Bd. 3, Lpz., 1910.

Герц в своей книге хотел свести всю механику к трем исходным понятиям: пространству, времени и массе, поэтому на первый взгляд его концепция представляется некоторой попыткой картезианского реванша, попыткой построения чисто кинетической системы. Но это только часть действительных логических и исторических связей концепции. «Принципы механики» Герца — продолжение ряда теорий, стремившихся свести сложные, несводимые к механике понятия физики XIX в. к кинетическим картинам, включавшим иногда гипотетические скрытые движения и скрытые массы. Такие попытки делал, в частности, Гельмгольц в восьмидесятые годы. Он оперировал циклическими движениями, свойства которых зависят не от величины координат, а только от скоростей их изменения.

Герц стремился не столько к сведению физических закономерностей к понятиям классической механики, сколько к сведению самих этих понятий к кинетическим моделям.

Исторически такая тенденция была навеяна не столько стремлением свести физику к механике, сколько физическим истолкованием механики и изменением основных ее понятий, включением в их число скалярных величин, имеющих размерность энергии.

Герц сам подчеркивает тесную связь между своей механикой и принципом превращения энергии. Старая механика сводила явления к центральным силам, действующим на расстоянии между атомами. Картина отдельных тел, связанных взаимным тяготением, была конечной целью научного объяснения мира.

«Но в конце XIX века, — говорит Герц, — физика отдала предпочтение другой точке зрения. Под влиянием того огромного впечатления, которое оказало на нее открытие принципа сохранения энергии, она предпочитает рассматривать относящиеся к ее области явления как превращения одной формы энергии в другую и видеть в качестве своей конечной цели сведение явлений к законам превращения энергии»<sup>1</sup>.

Но Герц не хочет заменить механическую картину тяготеющих масс феноменологическим представлением, т. е. ограничиться формулами, включающими энергию в виде основных величин, без представимой модели дискретных

---

<sup>1</sup> Die Prinzipien der Mechanik. Gesam. Werke, Bd. 3. S. 17.

тел и их движений. Поэтому Герц заменяет силы реальными движениями некоторых скрытых масс.

«Если мы хотим получить законченную, замкнутую в себе закономерную картину мира, то позади вещей, которые мы видим, мы должны допустить еще другие, невидимые вещи, искать за пределами наших чувств влияния чего-то скрытого от нас. И в первых двух картинах мира мы уже признали существование этих глубже лежащих влияний, мы представляли себе их как существа особого рода и для воспроизведения в нашей картине мира мы создали понятие силы и энергии»<sup>1</sup>. Отрицательная сторона этих понятий состоит в том, что они создают впечатление, будто в мире, кроме материальных вещей и их движения, имеют место и другие реальности. Поэтому Герц предпочитает оперировать скрытыми движениями и массами взамен энергии и силы.

«Мы можем признать, что нечто, скрытое от нас, оказывает свое влияние; но тем не менее мы можем отрицать, что это нечто принадлежит к какой-то особой категории. Перед нами открыта возможность принять, что и скрытое есть не что иное как опять-таки движение и масса, и при этом такое движение и масса, которые от видимых отличаются не по существу своему, а только в отношении к ним и к нашим обычным средствам восприятия. Это воззрение и составляет суть нашей гипотезы»<sup>2</sup>.

Герц не сразу подходит к основной цели — сведению картины мира к пространству, времени и массе. Сначала он хочет заменить понятие силы понятием энергии — именно кинетической энергии движущихся материальных точек. К ней сводится потенциальная энергия и все виды энергии, с которыми мы встречаемся в физике. По словам Планка, Герц «...отвергает различие между кинетической и потенциальной энергией, а вместе с тем и все проблемы, которые встречает исследование специальных видов энергии. Согласно Герцу, имеется не только один единственный вид материи, материальная точка, но и один только единственный вид энергии — кинетическая. Все остальные виды энергии, которые мы, например, обозна-

---

<sup>1</sup> Там же, S. 30.

<sup>2</sup> Там же.

чаем как энергию потенциальную, электромагнитную, химическую, тепловую, в действительности представляют кинетическую энергию движущихся материальных точек, и что делает действия всех видов ее столь различными, так это единственно только постоянные связи, существующие в природе между положением и скоростями этих материальных точек... Все движения в природе в последнем счете покоятся, таким образом, по Герцу, исключительно на инертности материи».

Когда Герц говорит о новых задачах теоретической механики, о ее стремлении рассматривать механические явления как превращения одной формы энергии в другую и в конце концов свести механические явления к превращениям энергии, то это соответствует действительной тенденции в науке XIX в. Механика действительно испытывала подобное воздействие со стороны физики, несводимой к ней, эмансипировавшейся от нее. В сущности все сделанные в конце XVIII в. и в XIX в. попытки обобщения принципов механики и выведения их из единого принципа выражали такую тенденцию. Две тенденции в развитии механики — обобщение математического аппарата и появление в механике физических по своей сути понятий энергии и действия — связаны между собой и исторически поддерживали друг друга.

Герц хотел построить механику, основываясь не на понятии силы, как это сделал Ньютон, а на понятиях, которые уже стали основными в физике. Для этого Герц дополняет два понятия, носящие, по его мнению, математический характер, — пространство и время — двумя собственно физическими понятиями — массой и энергией. Эти физические понятия обозначают физические сущности, которые остаются неизменными в изолированных системах. Пространство, время, массу и энергию можно связать между собой с помощью принципа Гамильтона. Герц формулирует исходный путь дальнейших построений: «Всякая система естественных масс движется так, как будто ей поставлена задача достигать данных положений в данное время и притом таким образом, чтобы в среднем за все время разность между кинетической и потенциальной энергиями была возможно меньшей».

Такое представление имеет, по мнению Герца, ряд преимуществ по сравнению с ньютоновой картиной, в

основе которой лежало не понятие энергии, а понятие силы.

Далее Герц считает возможным построить третью картину мира, в которую в качестве основных понятий входят только время, пространство и масса. Здесь не только сила, но и энергия должна быть сведена к понятиям пространства, движения и массы. Эти три понятия объединяются в законе, который напоминает закон инерции. «Каждое естественное движение самостоятельной материальной системы состоит в том, что система движется с постоянной скоростью по одному из своих прямейших путей». Очевидно, в этой формуле объединяется и закон инерции и принцип наименьшего принуждения.

Что же понимает Герц под «прямым» и «прямейшим» путями? Прямой путь — это путь, все элементы которого имеют одно и то же направление, этим он отличается от искривленного пути, элементы которого имеют различное направление. Кривизна соответствует скорости изменения направления при изменении положения точки. Герц рассматривает пути, характеризующиеся наименьшим искривлением. Это и есть прямейшие пути. Иногда они совпадают с кратчайшими. Таким образом Герц сближает основные принципы механики с геометрическими понятиями — учением о кривизне.

Смысл принципа прямейшего пути может быть выяснен при его сопоставлении с принципом наименьшего принуждения. У Гаусса мерой принуждения считается, как мы помним, величина

$$Z = \sum_{k=1}^{3n} m_k \left( \ddot{x}_k - \frac{X_k}{m_k} \right)^2.$$

Герц вводит понятие единичной массы ( $m_k = 1$ ) и заменяет единицей массу  $m_k$  в только что написанном выражении. Он рассматривает лишь свободные системы и  $X$  приравнивает к нулю. Поэтому гауссова мера принуждения принимает вид:

$$Z = \sum_{k=1}^N \ddot{x}_k^2.$$

Эта формула отличается от гауссовой еще одним обстоятельством, кроме  $m_k = 1$  и  $X_k = 0$ . Квадраты ускорений

суммируются от  $\kappa = 1$  до  $\kappa = N$ .  $N$  — это некоторое число, соответствующее количеству единичных масс и количеству связей, которые в механике Герца, помимо прочего, заменяют силы.

Далее Герц вводит важное для его задачи — геометризации основного принципа механики — понятие элемента длины  $ds$  и кривизны  $K$  траектории, которую описывает система. Элементы длины  $ds$  траектории связаны с элементами длины  $dx_k$  траекторий единичных масс, входящих в рассматриваемую систему, квадратичной формулой:

$$ds^2 = \sum_{k=1}^N dx_k^2$$

Ускорение  $\ddot{x}_k$  заменяется второй производной  $x_k$  по  $ds$ . С помощью других преобразований, которые здесь можно не указывать, Герц получает из гауссова выражения для меры принуждения  $Z$  формулу:

$$K = \sum_{k=1}^N \left( \frac{d^2 x_k}{ds^2} \right)^2,$$

где  $K$  (вернее, квадратный корень из  $K$ ) и представляет собой кривизну траектории. Эта величина получена из  $Z$  и в случае действительного движения должна иметь наименьшее значение, т. е.

$$\delta K = 0.$$

Разумеется, выражения «элемент длины» и «кривизна» имеют здесь  $N$ -мерный смысл; они определяются соотношениями  $N$ -мерной геометрии, причем эвклидовой, так как квадрат  $ds^2$  элемента пути определяется как сумма квадратов  $dx_k$ , т. е.  $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + \dots + dx_N^2$ .

Многомерный характер пространства механики Герца указывает на важное с исторической точки зрения обстоятельство. Герцу не удалось свести механику к кинематической картине движения масс (хотя бы и скрытых) в пространстве трех измерений. Он получил многомерные искривленные пространства, и это в последнем счете указы-

вает на неустранимость силы, представленной в виде искривления многомерной поверхности, на которой движется по геодезической линии материальная точка.

По словам Герца, при геометрическом представлении системы материальных точек и движения системы легко увидеть, что и сам принцип наименьшего действия является по существу геометрическим принципом, «который может быть обоснован и развит совершенно независимо от механики и который не находится с ней в более тесной связи, чем любое другое используемое механикой геометрическое познание». Развивая эти идеи дальше, Герц приходит к выводу, что прямейший путь совпадает с тем, что называется геодезической линией и в свою очередь каждая геодезическая линия представляет собой образ прямейшего движения материальной точки, а в многомерном пространстве — системы материальных точек. Герц, впрочем, оговаривает, что геодезическая линия не всегда изображает кратчайший путь. Она совпадает с кратчайшим путем лишь в случае достаточно близких положений движущейся материальной точки или системы.

Упомянутые идеи Герца и некоторых других механиков второй половины XIX в. имеют первостепенное историческое значение. Геометризация математики, сопоставление ее вариационных принципов соотношениям многомерной геометрии показывают, как обобщение классической механики подготовляло понятия и методы релятивистской теории, и не только разъясняет логическую структуру вариационных принципов, но также освещает их историческую роль. В конце XIX в. попытки геометризации вариационных принципов механики почти не прекращались. Постепенно в механике начало играть все большую роль представление Герца о динамической системе как точки, движущейся в многомерном пространстве. Силовые поля при этом представляются искривлениями многомерного пространства, нарушающими его евклидовость. Таким образом, систему можно рассматривать как свободную, заменить силы связями, а последние рассматривать как искривление многомерного пространства, и тогда переход системы из одного состояния в другое оказывается движением некоторой точки по геодезической линии, следовательно, исчезает различие между принципом инерции и вариационным принципом для движения системы в силовом

поле. Вернее сказать, что различие превращается в чисто геометрическое различие между «плоским» и искривленным многомерными пространствами.

Общая теория относительности впоследствии выполнила эту программу. Она геометризировала только гравитационные поля. Конечно, слово «только» здесь должно быть поставлено в кавычки, так как тяготение—это универсальная связь всех средоточий вещества и полей с пространством — временем. Поэтому с закономерностями тяготения связаны законы, определяющие поведение таких средоточий в пространстве (сохранение импульса) и во времени (сохранение энергии).

Самый принцип наименьшего действия означает, что материальная точка в отсутствии поля движется по геодезической линии евклидова пространства, т. е. по прямой, а в более общем случае — при наличии поля — вдоль геодезической линии на поверхности, обладающей некоторой кривизной.

До сих пор наиболее радикальным «вытеснением» силы и вместе с тем наиболее радикальным ограничением первоначальной абстракции классической механики было (если говорить о макроскопической физике) выведение уравнений движения из уравнений гравитационного поля. Если мы рассматриваем релятивистские (нелинейные) уравнения гравитационных полей и выводим из них уравнения движения, значит, сила рассматривается уже не как внешняя, данная, предельная для данной задачи сущность. Она теперь рассматривается, пользуясь термином Энгельса, и как пассивная, и как активная сторона движения<sup>1</sup>; речь теперь идет о взаимодействии движущихся тел и полей, о взаимодействии, которое мы уже не устраним абстрактным образом, как это делали в классической механике, в результате чего уравнения носили линейный характер.

Это не совсем то, что имел в виду Герц: сила не заменяется кинетическим представлением, а изменяет свой смысл. Понятие силы и понятие тела, испытывающего действие силы, приобретают иной характер. Такая модификация понятия силы явно связана с ограничением первоначальной абстракции: материальная точка рассматривает-

---

<sup>1</sup> См. Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955, стр. 225.

ся не как нечто, отличающееся абсолютным образом от окружающей среды и движущееся в ней, а как сингулярность в пространстве — времени, ставшем реальной физической средой — полем (гравитационным). Однако макроскопический характер теории относительности не позволял непосредственно подвергнуть ревизии идею себе-тождественной материальной точки.

Мы рассматривали принцип наименьшего расстояния в связи с попыткой Герца исключить из механики понятие силы. Теперь вернемся к пезависимому от этой попытки, вариационному принципу как таковому, но уже не к его формальному развитию, а к заполнению формальных построений Лагранжа, Гамильтона и Якоби новым, собственно физическим содержанием. Такое заполнение формального принципа новым физическим содержанием произошло под воздействием новых экспериментальных данных.

В XIX в. убедились, что величины, входящие в формулировку принципа Гамильтона, могут быть определены лишь экспериментом. Без включения экспериментальных данных принцип наименьшего действия в своем развитии будет все более конкретно показывать свойства тех числовых рядов, с помощью которых мы исследуем объективные физические соотношения, но не свойства самих соотношений. Между тем принцип наименьшего действия характеризует объективные физические соотношения наиболее инвариантным образом. Это обстоятельство не только определило значение принципа в физике XIX в., но и его судьбу в современной физике. В релятивистской физике вариационный принцип применяется в форме Гамильтона без каких-либо новых физических допущений о его содержании. Теория относительности позволила исчерпывающим образом разъяснить одну существенную, многократно обсуждавшуюся сторону принципа<sup>1</sup>. Действие, входящее в формулу Гамильтона (интеграл по времени от разности между кинетической и потенциальной энергией), в отличие от действия Лагранжа (интеграл по времени от кинетической энергии) инвариантно при переходе от одной инерциальной системы координат к другой инерциальной системе, иными словами, — инвариантно

---

<sup>1</sup> См. М. Планк. Физические очерки. М., 1925, стр. 95—96.

относительно преобразований Лоренца. В этом выражается четырехмерная природа гамильтонова действия. Четырехмерные пространственно-временные «расстояния» не в пример трехмерным, чисто пространственным расстояниям являются инвариантами преобразований Лоренца. Величины, характеризующие состояние материальной точки или системы материальных точек в один момент, представляют собой трехмерные пространственные проекции четырехмерного объекта, и они меняются в зависимости от выбора пространственного сечения четырехмерного мира. Величины, характеризующие поведение системы в течение конечного промежутка времени, могут быть при определенных условиях независимыми от такого выбора. Если мы определяем состояние системы в данный момент, исходя из ее поведения в течение конечного промежутка времени, охватывающего не только прошлое, но и будущее (например, состояние системы в полдень по ее поведению с одиннадцати часов до часа дня), то в этом нет ни грана телеологии; такая задача в принципе не отличается от задачи, где явления в одной пространственной точке определяются явлениями в других пространственных точках — спереди и сзади данной. Равноправность пространства и времени в теории относительности полностью снимает вопрос о «целесообразно действующей природе», игравший такую роль в истории принципа наименьшего действия. Чтобы вычислить величину действия системы, нужно произвести интегрирование по пространству, которое заполняет тела, входящие в систему, и по времени. Тогда мы получаем четырехмерную величину, инвариантную при переходе от одной инерциальной системы к другой.

Исходя из подобных соображений, Планк говорит, что принцип наименьшего действия, предполагающий симметричность всех четырех мировых координат (интегрирование по времени не выделяет временную координату, так как действие Гамильтона инвариантно по отношению к преобразованию Лоренца), служит центральным принципом, который проектируется в пространстве тремя законами сохранения компонент импульса, а во времени — законом сохранения энергии<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> М. П л а н к. Физические очерки. М., 1925, стр. 50,

Таким образом, теория относительности интерпретирует принцип наименьшего действия применительно к четырехмерному миру пространственно-временных событий как принцип, позволяющий отличить действительные мировые линии от возможных. При этом она не вносит в принцип нового физического содержания. Такое физическое содержание было внесено квантовой физикой; теория относительности могла бы «вывести» принцип наименьшего действия из более общих соображений только при условии некоторой интерпретации, связывающей самую теорию относительности с микромиром. Принцип наименьшего действия был применен Эйнштейном при построении общей теории относительности. В ней самое понятие действия приобрело некоторое новое освещение. Как известно, Эйнштейн, определяя кривизну пространства и времени, стремился устранить излишние параметры, характеризующие свойства пространства и времени и не характеризующие самую кривизну, с помощью четырех тождеств. Эти тождества по своему физическому смыслу означают тождественность кривизны пространства и времени в различных координатных системах. Тензор кривизны зависит от тензора энергии-импульса. Рассматривая последний, Эйнштейн отмечает, что здесь указанные четыре тождества приобретают физический смысл — именно, смысл законов сохранения. Они выражали свойства пространства и времени; но теперь, когда мы говорим о тензоре энергии-импульса, первое свойство пространства — его однородность — соответствует сохранению компонент импульса, а однородность времени — сохранению энергии. Таким образом, законы сохранения соответствуют тождественным соотношениям между компонентами тензора кривизны. Самой же кривизне как физическому свойству, независимому от того или иного координатного представления, соответствует действие. Эддингтон высказал очень тонкие и глубокие соображения о значении понятия действия в общей теории относительности. Он отметил, что действие для пространственно-временного континуума играет роль, аналогичную той роли, которую играет энергия по отношению к пространству. В четырехмерном мире действие представляет собой меру кривизны, т. е. основного свойства четырехмерного континуума, от которого зависит движение материальных точек. Отметим попут-

но, что Эддингтон, излагая единую теорию поля Вейля, вскользь упомянул о весьма интересной интерпретации понятия действия. Быть может, действие, говорит Эддингтон, является функцией вероятности, но когда вероятности перемножаются, действия складываются, следовательно, действие можно считать логарифмом вероятности. Поскольку логарифм вероятности — отрицательное число, действие следует рассматривать как логарифм вероятности со знаком минус. В этом случае принцип наименьшего действия означает наибольшую вероятность фактически осуществившегося движения.

В современной квантовой механике принцип наименьшего действия играет первостепенную роль; более того, именно размышления над понятием действия приводят к попытке обобщения существующей теории. Совпадение размерности основной величины, характеризующей микромир, — кванта действия — с величиной, входящей в основные соотношения макроскопической механики, — интегралом от энергии по времени — наталкивает современных теоретиков на ряд соображений, пока не приведших к конкретным физическим теориям, но, по-видимому, перспективных.

Упомянем о некоторых замечаниях Бертрانا Рассела<sup>1</sup>.

Из релятивистского соотношения между массой и энергией Рассел выводит возможность представить действие как произведение массы и времени. Однако гравитационная масса, а следовательно, и равная ей инертная масса, может быть представлена в виде расстояния, и тогда действие оказывается произведением длины и времени. Подходя с этой точки зрения к постоянной Планка, Рассел говорит: «Может быть, если бы мы взяли действие как одно из основных понятий физики, мы бы смогли построить физику насквозь атомистическую и полностью доступную проверке».

Рассел указывает дальше на многозначительную связь между инвариантностью пространственно-временного интервала в теории относительности и ролью действия — именно кванта действия в физике микромира. Подобные соображения не привели, как только что было сказано, к действительному прогрессу физических знаний, но заслуживают упоминания, так как характеризуют харак-

<sup>1</sup> B. Russell. The analysis of Matter. 1927, p. 342.

тер и стиль современных воззрений на роль действия при дальнейшем обобщении квантовой механики.

С исторической точки зрения важно подчеркнуть, что открытие прерывности действия означает новую ступень в развитии принципа Гамильтона. У Гамильтона формулировка принципа наименьшего действия была тесно связана с оптико-механической аналогией. Но в XIX в. такая аналогия могла приводить лишь к неопределенным соображениям о единстве закономерностей волнового движения в континуальной среде и движения дискретных тел. Напротив, в физике XX столетия, начавшегося великим открытием Планка, оптико-механическая аналогия могла стать стержневой идеей физики. Гамильтон говорил о некоторой поверхности равного действия; движение этой поверхности он рассматривал, не говоря о каком-либо периодическом процессе. Сама аналогия с поверхностью одной фазы наталкивалась на существенные затруднения. Оптико-механическая аналогия требовала, чтобы аргумент косинуса в формуле рассматриваемого волнового движения был безразмерной величиной. Для этого нужно было разделить действие на некоторую величину, также имеющую размерность действия. Такая величина была введена в физику Планком. После этого де Бройль мог написать выражение для волны:

$$u = C \cos \frac{2\pi}{h} S,$$

в котором аргумент косинуса имеет физический смысл. Оптико-механическая аналогия позволила де Бройлю найти рациональное истолкование квантовых условий Бора и вместе с тем придать физический смысл неоднократно проводившимся аналогиям между принципом наименьшего действия и оптическим принципом Ферма.

В последующем развитии квантовой механики прерывность действия оставалась ее исходным допущением. Эта прерывность, позволив объяснить соотношение квантовой механики, сама по себе не находила объяснения и, таким образом, играла роль предельного понятия теории. Прерывность действия может получить каузальное истолкование при дальнейшем обобщении квантово-релятивистской теории. Попытки такого обобщения, по-видимому,

приведут к некоторой новой интерпретации самого понятия действия. Не исключено представление о действии, деленном на постоянную Планка, как о числе пространственно-временных клеток, в которых происходят трансмутационные процессы, клеток, которые в макроскопической аппроксимации можно рассматривать в виде мировой линии себестоимостной элементарной частицы. Тогда вероятность мировой линии связывается с действием соотношением, о котором говорил Эддингтон, и принцип наименьшего действия становится принципом наибольшей вероятности.

---

#### IV. ПРИНЦИП СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

История вариационных принципов показывает, как математическое обобщение понятий механики подготовляло новое, собственно физическое переосмысливание этих понятий. Физическим эквивалентом обобщенного математического аппарата механики, созданного Лагранжем, Гамильтоном, Остроградским, Якоби, Гельмгольцом и другими мыслителями XVIII—XIX вв., была физическая картина превращений энергии, выходящая за рамки механики, включавшая немеханические образы, картина, нарисованная творцами термодинамики, статистической физики и электродинамики.

Сохранение энергии — основной принцип физики. Вместе с тем принцип сохранения энергии может рассматриваться и как собственно механический принцип, а понятие энергии — как механическое понятие. Именно так они и рассматривались вплоть до середины XIX в. Впоследствии понятие энергии механической системы стало частным случаем более общего понятия энергии, включающей качественно различные формы, переходящие друг в друга количественно-эквивалентным образом. Переход энергии из одной формы в другую лежит в основе ее общего определения, выходящего за рамки механики, в основе качественного понимания принципа сохранения энергии. Чисто отрицательная и количественная констатация — энергия не исчезает и не создается — достаточна для механики. Для физики специфична положительная и качественная сторона дела: энергия в данной ее форме исчезает, превращается в энергию в иной форме (с соблюдением количественной эквивалентности). Поэтому для исторического и логического анализа перехода от механики и чисто механической физики XVIII в. к отчасти эмансипировавшейся физике XIX в. важно проследить генезис

качественного и положительного понимания принципа сохранения энергии. Оно было отчетливо высказано Энгельсом<sup>1</sup>, содержалось в ряде собственно физических исследований, особенно в восьмидесятые годы, и было историческим пунктом перехода к собственно физическому пониманию принципа.

Энгельс связывал констатацию положительной стороны принципа сохранения энергии с анализом соотношения принципа сохранения энергии и принципа сохранения импульса. Коллизия двух мер движения  $mv$  и  $mv^2$  и, соответственно, соотношение между сохранением импульса и сохранением энергии является одной из основных проблем при историческом анализе классической физики и генезиса обобщенного представления о движении, несводимом к перемещению. Мы остановимся на указанной коллизии, сделав предварительно несколько замечаний о развитии понятия энергии в механике.

В XVII в. наряду с чисто кинетическими принципами физики Декарта и динамическим направлением, поставившим в центр механики понятие силы, появилось третье направление, связанное с именами Гюйгенса и Лейбница. Это направление уже тогда выдвинуло в качестве центрального понятия механики живую силу, т. е. произведение массы на квадрат скорости:  $mv^2$ . Такое произведение, фигурировавшее в качестве лейбницевой меры движения и противопоставленное картезианской мере — произведению массы на скорость  $mv$  (т. е. импульсу), именовалось живой силой, но, конечно, коренным образом отличалось от ньютоновой силы. Последняя измеряется произведением массы на ускорение и, конечно, не сохраняется. Ньютон, комментируя третий основной закон движения, писал об *actio agentis* — произведении силы на соответствующую компоненту скорости точки приложения силы<sup>2</sup>. Но Ньютон не помышлял о системе механики, выведенной из принципа сохранения некоторой меры движения, неизменной в случае упругого удара и т. п. механических явлений.

Что же касается принципа сохранения энергии в совре-

---

<sup>1</sup> См. Ф. Энгельс. Айти-Дюринг. М., 1953, стр. 13.

<sup>2</sup> Ньютон. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова. Изв. Ник. морск. академии, вып. IV, Петроград, 1915, стр. 40—42.

менном смысле, то Ньютон прямо писал об уничтожении движения в случае неупругого удара или в случае трения.

В механике XVII—XVIII вв. идея сохранения некоторой меры движения идет от Галилея, у которого можно найти в живом, чаще всего неопределенном, еще не выкристаллизовавшемся и не застывшем виде большинство основных понятий классической механики. Доказывая, что скорость падающего тела в данной точке зависит только от расстояния по вертикали между данной точкой и начальной, Галилей ссылается на возможность в случае неоднозначно определенной скорости использовать ее для подъема тела на уровень, более высокий, чем начальный. В этом случае был бы построен вечный двигатель.

У Гюйгенса невозможность поднять центр тяжести системы тел выше начального уровня за счет веса тел стала основой теории маятника. Невозможность такого подъема опирается на невозможность вечного двигателя, которая представляется Гюйгенсу очевидной.

В самом конце XVII в. (в 1695 г.) Лейбниц назвал живой силой (*vis viva*) произведение  $mv^2$  (сто тридцать с лишним лет спустя, в 1829 г., Кориолис разделил эту величину на 2). Понятие (но не наименование) живой силы фигурировало еще раньше в теории упругого удара. Было не только установлено сохранение живой силы при упругом ударе (Врен, Гюйгенс), но и потеря ее при неупругом ударе (Валлис).

Наряду с термином «живая сила» в механике XVII—XVIII вв. появился термин «энергия». Этот термин *ἐνεργεια* встречается уже у Аристотеля в качестве физического понятия. В новое время им пользовался Галилей, а впоследствии Иоганн Бернулли<sup>1</sup>. Последний отождествлял энергию с работой (впрочем, лишь в одном, ныне утраченном письме к Вариньону). Иоганн Бернулли, поддерживая идеи Лейбница и говоря о сохранении живой силы, рассматривал случай исчезновения механического движения и понятие не исчезающей при этом способности производить работу (*facultas agentis*). Он говорил, что эта способность сохраняется в другой форме, например в виде сжатия. Но Иоганн Бернулли в известных нам работах и, по-видимому, в упомянутом письме к Вариньону не думал

<sup>1</sup> М. Планк. Принцип сохранения энергии. М.—Л., 1938, стр. 22.

о немеханических количественных понятиях, которые позволили бы измерить *facultas agenti*, сохраняющуюся при исчезновении живой силы.

Эйлер, подобно Иоганну Бернулли, рассматривал сохранение живых сил как универсальный закон механики. Он показал, что живая сила материальной точки, находящейся в поле тяготения или в поле сил отталкивания некоторого неподвижного центра, принимает начальное значение, когда точка возвращается к начальному положению в пространстве. У Эйлера можно встретить понятие, совпадающее с понятием работы. Он пишет о приращении живой силы, измеряемой произведением силы на путь, пройденный материальной точкой, называя эту величину *effort*. Даниил Бернулли, посвятивший специальную работу сохранению живых сил<sup>1</sup>, обобщил закон сохранения, рассмотрев ряд задач о движении материальной точки в различных условиях. В вышедшей за десять лет до упомянутой работы «Гидродинамике» (1738) Даниил Бернулли уже широко пользовался принципом сохранения живых сил, придавая ему чисто механический смысл.

Как известно, «Гидродинамика» Бернулли содержит главу, в которой рассматриваются беспорядочные движения молекул газа<sup>2</sup>. Эта глава — один из самых ранних документов кинетической теории тепла. Таким образом принцип сохранения живых сил и кинетическая теория теплоты встретились под одним переплетом. Но синтез этих идей там не было, его не знал ни XVIII в., ни первая половина следующего столетия. Живая сила молекул и живая сила макроскопических тел были, если можно так выразиться, слишком близкими родственниками, чтобы вступить в плодотворный союз. Чисто механическое понятие живой силы столкнувшихся при неупругом ударе макроскопических тел и родственное ему по природе (более того, совпадающее с ним по существу) понятие живой силы невидимых частиц, в которую перешла живая сила тел, — эти понятия не могли стать непосредственной основой закона сохранения энергии. Требовалось сопоставле-

---

<sup>1</sup> D. Bernoulli. Remarques sur le principe de la conservation des forces vives, pris dans un sens général. Histoire de l'Académie de Berlin, 1748, p. 356.

<sup>2</sup> См. русский перевод этой главы в сборнике «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., 1934.

ние динамической переменной, включающей чисто механические величины, с макроскопической переменной (количеством тепла), включающей немеханическую величину (температуру).

Со стороны механики подготовка такого сопоставления состояла в последовательном развитии и уточнении понятия работы. Оно фигурировало под различными псевдонимами у всех крупных механиков XVII—XVIII вв., начиная с Гюйгенса и Лейбница. Сам термин «работа» (*travail*) появился только в XIX в. — его ввел Понселе в своем известном трактате о прикладной механике<sup>1</sup>.

Термин «энергия» в смысле динамической переменной с размерностью лейбницево́й меры движения появился в начале XIX в. у Юнга в его известном курсе натуральной философии (1807). В этом же курсе излагается кинетическое воззрение на теплоту, но оно снова не соединилось с развиваемой в книге идеей сохранения живой силы. Это произошло только в середине XIX в., после того как кинетическая теория приобрела однозначный характер и, с другой стороны, принцип сохранения энергии был в макроскопической теории обобщен и распространен на немеханические и, в частности, на тепловые процессы. У Юнга кинетическое предствление о теплоте было достаточно неопределенным. В то же время и идея сохранения оставалась у него идеей механики. При центральном ударе сохраняется количество движения двух тел — это первый тезис Юнга<sup>2</sup>. Наряду с количеством движения — картезианской мерой Юнг пользуется понятием живой силы и именует эту величину *э н е р г и е й* движущегося тела. Он говорит, что действие движущегося тела на преодолеваемые им препятствия (например, глубина дыры, пробиваемой шаром в мягкой глине или в стеарине) пропорционально квадрату скорости. Но Юнг отнюдь не склонен вводить немеханические количественные понятия, немеханические величины и сопоставлять их с живой силой. Он говорит о сохранении энергии в случае столкновения идеально упругих шаров, т. е. в случае, когда механическое движение не переходит в другую форму движения.

<sup>1</sup> Poncelet. Cours de mécanique appliquée aux machines. Metz, 1826.

<sup>2</sup> Th. Young. A course of lectures on natural philosophy. London, 1807, p. 75.

На всем протяжении развития идеи живой силы и ее сохранения, от Лейбница до д'Аламбера, продолжалась дискуссия о том, какая величина — живая сила  $mv^2$ , или картезианская мера  $mv$  — должна считаться мерой движения. Д'Аламбер высказал некоторые соображения о применимости обеих мер. Но вопрос не был решен. Действительное соотношение между сохранением  $mv$  и сохранением  $mv^2$  в последнем счете связано с соотношением свойств пространства, с одной стороны, и свойств времени, — с другой. Поэтому строгое и четкое решение проблемы требовало в качестве исторической предпосылки релятивистского обобщения классической физики, в связи с которым была полнее и глубже разъяснена связь между пространством и временем. Но задолго до того как появилось представление о четырехмерном векторе энергии-импульса, задолго до выяснения связи между законами сохранения и преобразованиями пространства и времени уже высказывались идеи, в некоторой мере предвосхищавшие современную трактовку. Здесь, как и в ряде других случаев, математическое и философское обобщение классической физики прокладывало дорогу к ее релятивистскому обобщению.

Философское обобщение, приводившее к идее объективного существования форм движения, к которым применимы в качестве меры  $mv$  и  $mv^2$ , дано Энгельсом. К нему мы также сейчас перейдем и увидим, что Энгельс знал не только о существовании таких форм движения, но и о несводимости одной формы к другой.

Коснемся двух статей Энгельса: «Основные формы движения» и «Мера движения.— Работа». В этих статьях, как и в других отрывках, вошедших в «Диалектику природы», отчетливо видно направление главного удара в естественнонаучных выступлениях Маркса и Энгельса — борьба против «разносчиков материализма» за диалектику и философское обобщение стихийных представлений о неисчерпаемой сложности природы, о нелинейности ее подлинных закономерностей, о взаимодействии, — представлений, которые пробивали себе дорогу в науке XIX в. и резко отделяли ее от науки предшествовавшего столетия.

Работа «Основные формы движения» начинается известным определением движения в самом общем смысле как формы бытия материи. В этом смысле движение охва-

тывает все происходящие в природе процессы, начиная от перемещения и кончая мышлением<sup>1</sup>. Далее речь идет о природе как совокупности связанных между собой тел, которыми могут быть и системы тел,— любые дискретные части вещества от звезд до атомов. Взаимная связь этих тел, их взаимодействие и является движением: «...это их взаимное воздействие друг на друга и есть именно движение»<sup>2</sup>.

Определение движения как взаимодействия указывает на глубокую, субстанциональную, неустранимую нелинейность основных закопомерностей мира. Но для научного исследования природы в качестве первого приближения связь между телами можно считать линейной: одно тело играет активную роль, и его движение рассматривается как сила, приложенная ко второму, движение (ускорение) второго тела играет пассивную роль (проявление силы), его обратное влияние на первое тело не рассматривается. Силы рассматриваются в дальнейшем как центральные. Поэтому взаимодействие тел может быть либо притяжением (уменьшением расстояния), либо отталкиванием (увеличением расстояния). Понятия притяжения и отталкивания играют большую роль в последующих соображениях Энгельса.

Теплота, по мнению Энгельса, представляет собой форму молекулярного отталкивания, она противостоит силам связи между молекулами, нарушает их, приводит к переходу твердого тела в другие агрегатные состояния. Развивая аналогичные представления в отношении электромагнитных явлений и химических реакций, Энгельс приходит к мысли о различных формах притяжения и отталкивания, о различных формах движения.

С этой точки зрения притяжение (сила притяжения) есть не что иное, как название пекоторой причины движения (ускорения) рассматриваемого тела, к которому приложена сила, причины, которую мы не определяем либо не можем определить. Такое понятие законно, пока мы рассматриваем тело, движущееся под действием силы, только как пассивную сторону (мы могли бы теперь сказать: пока перед нами линейная связь), пока мы не рас-

---

<sup>1</sup> Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955, стр. 44.

<sup>2</sup> Там же, стр. 45.

смотрим тех форм отталкивания, которые были действительным источником воздействия, испытываемого рассматриваемым телом. Таким образом, все дело в том, что мы рассматриваем действующую на тело силу как нечто данное и независимое. Можно сказать, что понятие силы в том смысле, в каком его ввел Ньютон, закономерно в пределах линейного приближения.

Таковы некоторые исходные положения работы «Основные формы движения». Разумеется, в свое время они не могли быть изложены в современных выражениях, ряд необходимых для этого понятий и соотношений вошел в науку и получил в ней признание и распространение позже.

Перейдем к следующей работе Энгельса «Мера движения.— Работа». В ней прослеживается эволюция представлений о двух мерах движения в XVII—XIX вв., в особенности эволюция этих представлений от д'Аламбера до Гельмгольца.

Точка зрения д'Аламбера высказана в предисловии к известному трактату о динамике. Эта точка зрения тесно связана с основными представлениями д'Аламбера о механике и ее основных понятиях.

В указанном трактате д'Аламбер дает очень глубокое определение механики как науки, рассматривающей соотношение между пространственными и временными величинами. На примере пространства и времени д'Аламбер показывает,— это сохраняет отнюдь не только исторический интерес для современной науки,— что нельзя сравнивать один с другим предикаты, относящиеся к разным классам, но можно сравнивать друг с другом отношения этих предикатов к некоторым единичным предикатам.

Д'Аламбер сопоставляет время с некоторой прямой. Это означает параметризацию времени, так как речь идет об измеримой и измеренной прямой.

«Нельзя сравнивать между собой две вещи различной природы, какими являются пространство и время, но можно сравнивать отношение частей времени с отношением частей пройденного пространства. Время по своей природе течет равномерно, и механика исходит из этой равномерности. Поскольку мы, однако, не знаем времени как такового и не обладаем точной мерой времени, мы не

можем составить себе более ясного представления об отношении частей времени иначе, чем при помощи отношения отрезков неограниченной прямой линии»<sup>1</sup>.

Далее речь идет о пространственно-временном графике. «Отношение же между частями такого рода линии может быть связано с отношением между частями пространства, пройденного телом, движущимся произвольным образом, при помощи некоторого уравнения, а именно: можно представить себе кривую, абсциссы которой будут соответствовать частям времени, протекшего с начала движения, а ординаты — пространствам, пройденным за эти части времени»<sup>2</sup>.

Теперь представим себе, что пространство является функцией времени и эта функция изображена некоторой кривой. Кривая показывает отношения параметризованных и поэтому сравнимых величин. Пространство и время непосредственно не сравнимы; но параметризованное пространство, представляющее собой отношение пространства к некоторой пространственной единице, может быть сравнимо с параметризованным временем — отношением времени к некоторой единице времени. Между этими двумя отношениями устанавливается отношение, изображенное кривой.

«Уравнение этой кривой будет выражать не соотношение между пространством и временем, а если можно так выразиться, соотношение между отношением частей времени к единице времени и отношением частей пройденного пространства к единице пространства. В самом деле, уравнение кривой можно рассматривать или как соотношение между ординатами и абсциссами, или как уравнение, связывающее отношения ординат к единице ординат с отношениями соответствующих абсцисс к единице абсцисс»<sup>3</sup>.

Естественной основой для параметризации времени является движение по инерции. Вводя понятие равномерного движения, д'Аламбер говорит: «Мне кажется, что указанный закон равномерности, присущий движению как таковому, дает нам одно из лучших оснований, на которое

---

<sup>1</sup> Ж. д'Аламбер. Динамика. М.—Л., 1950, стр. 19.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Там же, стр. 20.

может опираться измерение времени при помощи равномерного движения»<sup>1</sup>.

Понятие инерции есть отрицательная антиципация положительного понятия силы как причины ускорения.

«Поскольку установлена «сила инерции» (д'Аламбер имсет в виду в данном случае инерцию, в то время еще не было четкого рзграничения этих понятий.— *Б. К.*), т. е. свойства тела неизменно пребывать в состоянии покоя или движения, ясно, что если для начала движения необходима та или иная причина, то и для ускорения или замедления этого движения также необходима внешняя причина. Что же это за причины, способные произвести или заменить движение в телах? К настоящему времени нам известно только два рода этих причин: одни проявляются для нас вместе с производимыми ими действиями или, вернее, с действиями, причиной которых они являются. Эти причины имеют своим источником осязаемое действие тел друг на друга, обусловленное их непроницаемостью, они сводятся к удару и к некоторым другим производным от него действиям. Все другие причины мы познаем лишь по их действию, природа же их самих нам совершенно неизвестна: такова причина, заставляющая тяжелые тела падать к центру Земли, причина, удерживающая планеты на их орбитах, и т. п.»<sup>2</sup>

Итак, д'Аламбер разделяет силу, которую явно можно свести к движению других тел, и силу, природа которой неизвестна. В качестве подобных сил д'Аламбер приводит силы, которые соответствуют современному понятию потенциального поля. В этом втором случае следует пользоваться феноменологическим описанием с помощью уравнений, связывающих пространство с временем.

«Вообще в неравномерных движениях, причины которых неизвестны, действие, произведенное причиной,— или в течение конечного времени, или в течение одного мгновения,— очевидно, должно быть задано при помощи уравнения, связывающего время и пространство»<sup>3</sup>.

Д'Аламбер исключает из механики вопрос о природе этих сил. С этих позиций он и подходит к дискуссии о

---

<sup>1</sup> Ж. д'Аламбер. Динамика. М.—Л., 1950, стр. 20.

<sup>2</sup> Там же, стр. 20—21.

<sup>3</sup> Там же, стр. 21.

мере движения. Д'Аламбер считает этот вопрос бесплодным: «...затронутый вопрос представляет собой не более как совершенно бесплодный метафизический спор или спор о словах, недостойный внимания философа»<sup>1</sup>.

Д'Аламбер говорит, что любая задача дает одно и то же решение независимо от принятой меры движения.

Из сказанного видно, что по существу д'Аламбер утверждает правильность обеих мер движения. Но, как заметил Энгельс, утверждение, что в статике применяется произведение массы на скорость, а в динамике произведение массы на квадрат скорости, это в общем правильное различие «...имеет не больше логического смысла, чем известное унтер-офицерское решение: на службе всегда «мне», вне службы всегда «меня». Его принимают молча: это уж так, мол, получается, и мы тут не можем ничего изменить, и если в подобной двойкой мере заключается противоречие, то что же мы можем поделать?»<sup>2</sup>.

Разграничение  $mv$  и  $mv^2$  как не исключających друг друга мер движения принимает рациональный характер, если речь идет о мерах двух различных процессов. Эта мысль содержалась в работах Гельмгольца. Но Гельмгольц часто говорил о прагматическом значении обеих величин  $mv$  и  $mv^2$ . В противовес такой прагматической тенденции Энгельс говорит о реальном разграничении двух процессов как об основе существования двух мер движения. Если процесс ограничивается механикой (механическое движение переносится, оставаясь механическим), то мерой его служит произведение массы на скорость. Если же в данном процессе механическое движение исчезает, превратившись в другую форму движения, то в новой форме движение пропорционально лейбницевой мере исчезнувшего механического движения, т. е. массе, помноженной на квадрат скорости. Картезианская мера движения соответствует механическому движению, измеряемому механическим же движением, а мера движения Лейбница — механическому движению, измеряемому другой формой движения. Работа — это изменение формы движения, рассматриваемое с его количественной стороны.

Согласно Энгельсу, переход от  $mv$  к  $mv^2$  как мере дви-

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 27.

<sup>2</sup> Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955, стр. 64.

жения,— это переход от механики к физике. Такая концепция соответствует действительной исторической роли понятия энергии. Чтобы выяснить вопрос, нужно вернуться к понятиям инерции и силы.

В одном из отрывков «Диалектики природы» Энгельс рассматривает механическое движение как результат другого механического движения либо как результат превращения более сложной формы движения в перемещение<sup>1</sup>. Это замечание о возможности немеханического движения как действительной причины механического движения выражает одну из основных идей «Диалектики природы» и один из основных стихийных выводов естествознания XIX в.— обобщенное представление о движении. Когда Энгельс говорит об ускорении тела в результате удара, в виде силы фигурирует движение в обычном механическом смысле, если не рассматривается упругость тела, связанная с собственно физическими концепциями. Именно к таким явлениям и стремились свести силы сторонники чисто кинетической механики без понятия силы. Если на этом пути встречались затруднения, вводили понятия скрытых масс или скрытых движений. Но движение в общем смысле может не сводиться к перемещениям тел. Сила может быть результатом большого числа беспорядочных отдельных движений и несводимость тогда проявляется в необратимости. Сила может быть результатом волновых процессов в реально непрерывной среде. Немеханический характер процессов в континуализированной или континуальной среде ведет к необходимости пользоваться понятиями, принципиально отличающимися от понятий смещения материальных точек и производных от смещений по времени.

Понятие энергии и его отличие от понятия импульса связано у Энгельса с представлением о немеханическом движении, которое служит источником механического движения и связано с ним взаимными переходами, при которых сохраняется работа как мера движения.

Уже у Лейбница сохранение движения иногда связывалось с представлением о невидимых движениях в микрокосме. «Я утверждал,— пишет он,— что действующие силы сохраняются в этом мире. Мне возражают, что два

---

<sup>1</sup> См. Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955, стр. 225.

мягких или неупругих тела, встречаясь друг с другом, теряют свою силу, я отвечаю: нет. Верно, что тела в целом теряют силу, в отношении ко всему движению, но части тела приобретают движение, в которое их приводит взаимное столкновение. Таким образом, здесь лишь видимая потеря силы. Силы не разрушаются, но распределяются между мелкими частицами. Это не значит потерять их, а значит сделать то, что делают при обмене крупной монеты на мелкую».

В дальнейшем мы остановимся на развитии молекулярно-кинетических представлений в связи с принципом сохранения энергии в XIX в.; здесь же будем придерживаться макроскопических понятий.

В XVIII в. сохранение живых сил обосновывалось обычно ссылками на принцип причинности. Для большого числа мыслителей XVIII в. эквивалентность причины и действия это эквивалентность двух механических процессов. Если один из этих процессов представляется немеханическим, т. е. состоит в изменении каких-то качественных свойств тела (например, в изменении температуры), значит, под внешней немеханической видимостью нужно искать действительный механический субстрат — движение тел, не видимых из-за своих малых размеров. Большинство естествоиспытателей XVII—XVIII вв. именно так смотрело на теплоту. Однако идея превращения механического движения в теплоту и кинетические представления о теплоте ограничивались из-за устойчивости концепции теплорода. Против теплорода выступали многие мыслители XVII—XVIII вв., но это понятие сохранялось по ряду весьма основательных причин.

Сталкиваясь с общеизвестными фактами нагревания тел при трении и ударе, физики XVIII и начала XIX в. апеллировали к понятию теплоемкости. Они полагали, что при трении двух кусков дерева изменяется его теплоемкость, и то же самое количество теплоты дает более высокую температуру. Поэтому решающее значение для победы новой точки зрения имели эксперименты, доказавшие, что теплоемкость не изменяется при трении тел. Эти эксперименты были проделаны Румфордом на рубеже XVIII—XIX вв. Румфорд, наблюдая за сверлением пушек, видел, как много тепла выделяется при этом. С точки зрения теории теплорода повышение температуры может быть

объяснено лишь изменением теплоемкости. Румфорд обнаружил, что такого изменения нет. Он положил в воду горячие стружки, образовавшиеся при сверлении пушек, и равное весовое количество металла, нагретого до той же температуры не трением, а теплопередачей. Оказалось, что теплоемкость и того и другого металла одинакова.

После Румфорда Гемфри Дэви — решительный противник идеи теплорода — повторил и продолжил его опыты. Он заставлял куски льда таять в результате трения друг о друга. Затем Дэви измерял температуру получавшейся воды и сравнивал ее с температурой воздуха. Так как при таянии теплоемкость воды возрастает, то повышение температуры никак нельзя было свести к освобождению теплорода, и опыты, таким образом, говорили об иной природе теплоты. После ряда аналогичных экспериментов Дэви счел окончательно доказанной гипотезу волновой природы теплоты. Несколько позже Томас Юнг в работе «О теории света и цветов» решительно высказался в пользу волновой теории теплоты, против идеи теплорода.

В упоминавшемся «Курсе лекций по натуральной философии» (1807) Юнг утверждает, что теплота не отличается по своей природе от света, что она представляет собой лишь несколько более медленные колебания, чем те, которые дают ощущение света. Наряду с исследованием теплоемкости и учением об упругости газов, открытия Гей-Люссака, Дюлонга, Пти и др. в значительной степени подготавливали механическую концепцию тепла. Расширение газов в зависимости от температуры означало получение механической работы за счет тепла. Когда обнаружили повышение температуры в результате сжатия газа, была создана экспериментальная база для развития идеи взаимных переходов механической работы и теплоты. С другой стороны, термохимия показала постоянство количества тепла, выделяющегося при каком-либо химическом процессе, независимо от пути, которым идет процесс. Это открытие однозначно связывало теплоту с химическими реакциями, что также противоречило идее теплорода.

Генезис термодинамики был непосредственно связан с распространением паровых машин. В 1824 г. появились «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных проявить эту силу» Сади Карно — одна из гениальнейших физических работ всех времен. «Никто не со-

мневается, что теплота может быть причиной движения, что она даже обладает большой двигательной силой: паровые машины, ныне столь распространенные, являются этому очевидным доказательством», — так Карно начинает свои «Размышления». Затем он характеризует значение и перспективы паровой техники: «Если когда-нибудь улучшения тепловой машины пойдут настолько далеко, что сделают дешевой ее установку и использование, то она соединит в себе все желательные качества и будет играть в промышленности роль, всю величину которой трудно предвидеть, ибо она не только заменит имеющиеся теперь в употреблении двигатели удобным и мощным двигателем, который можно повсюду перенести и поставить, но и даст тем производствам, к которым будет применено быстрое развитие и может даже создать новые производства»<sup>1</sup>.

Однако теория тепловых двигателей отстает от практики. Улучшение паровых машин почти во всех случаях носит эмпирический и случайный характер. В частности, не решен вопрос, который паровая машина поставила перед физикой: «ограничена или бесконечна движущая сила тепла, существует ли определенная граница для возможных улучшений, граница, которую природа вещей мешает перешагнуть каким бы то ни было способом, — или, напротив, возможны безграничные улучшения»<sup>2</sup>. Этот вопрос и подлежит рассмотрению. При этом необходимо отвлечься от конкретных машин и изучить вопрос о получении движения из теплоты в общей форме. Мы подробно будем говорить о теории Карно в связи с идеей энтропии. Здесь отметим главное: Карно объясняет возникновение механической работы не затратой тепла, а переходом тепла из котла в конденсатор. Тепло — особый тепловой флюид, теплород — передвигается из резервуара, обладающего более высокой температурой, в резервуар, обладающий менее высокой температурой. Если пользоваться понятием энергии, которого у Карно, конечно, не было, то можно сказать: энергия движения теплорода переходит в энергию движения поршня. Тепловой двигатель может работать по обратному циклу и превратиться в холодиль-

<sup>1</sup> Сборник «Второе начало термодинамики». М.—Л., 1934, стр. 17.

<sup>2</sup> Там же, стр. 19.

ную машину. Тогда он будет представлять собой как бы насос, перекачивающий тепло (теплород) из менее нагретого резервуара в более нагретый, т. е. насос, увеличивающий температурный перепад между двумя резервуарами.

Концепция Карно была механической, разумеется в ином смысле, чем механические теории тепла, выдвинутые мыслителями XVIII в., и в ином смысле, чем теория Майера. Механический характер концепции Карно, ее совместимость с принципом сохранения энергии и различия между понятиями «механическая», примененными к концепции Карно и к другим теориям, становятся отчетливо видными, если сопоставить различные ответы на вопрос: за счет чего производится механическая работа в тепловой машине. Бернулли, рассматривая движение поршня в цилиндре, наполненном газом, объяснял это движение эквивалентной затратой (т. е. исчезновением) ж и в ы с и л беспорядочно движущихся молекул. Майер и феноменологическая термодинамика (первое начало) связывали возникновение механической работы с исчезновением эквивалентного количества тепла. Карно считал источником работы теплового двигателя также р а б о т у, именно работу перемещения неуничтожаемого количества тепла — теплорода. Работа производится за счет эквивалентной затраты другой работы: работа движущегося цилиндра за счет работы движущегося теплорода. Превращения теплоты в работу, уничтожения теплоты не происходит: тепловая машина работает по тому же принципу, что и гидравлическая, только вода заменена теплородом, а уровень воды — температурой. Сила тяжести воды, помноженная на высоту падения, эквивалентна живой силе. Производство количества теплоты (теплорода) на разность температур эквивалентно работе, произведенной тепловой машиной. Клапейрон, излагая концепцию Карно, вычислял эквивалент произведенной работы, умножая количество теплоты на температуру (температурный перепад). По его вычислениям, переход калории через температурный перепад в один градус соответствует подъему 1,41 кг на один метр. Такой эквивалент механической работы соответствует закону сохранения энергии, если под энергией, сопоставленной с механической работой, понимать произведение количества тепла и температуры<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> См. М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 25.

Представление о произведении количества тепла на температуру как об эквиваленте работы позволило Вильяму Томсону<sup>1</sup> определить температуру через работу и количество теплоты. Температура (температурный перепад) определяется работой, производимой калорией тепла при таком перепаде. Так возникло понятие абсолютной температуры.

Мы видим, что концепция Карно была механической в том смысле, что цикл теплового двигателя уподобляется циклу гидравлического двигателя или вообще двигателя, где не происходит переходов движения из одной формы в другую. Вместе с тем теория Карно отходила от механических воззрений XVII—XVIII вв., рассматривая температуру как свойство особого флюида, аналогичное гравитационному потенциалу обычной материи.

Нужно сказать, что в тридцатые годы Карно приблизился к иной концепции, которая принципиально отличается от концепции Майера. В «Размышлениях» Карно все время оперирует переходами теплорода, но в ряде мест как бы предчувствует в отдельных, вскользь брошенных замечаниях другую, новую теорию тепла. Он пишет, например: «Основной закон, который мы старались установить, требует, по нашему мнению, новых подтверждений, чтобы быть вне всякого сомнения; он опирается на признаваемую в настоящее время теорию тепла, которая, нужно сознаться, не представляется нам непоколебимой твердости. Решить вопрос могут только новые опыты. Пока мы будем заниматься приложением высказанных выше теоретических идей, считая их точными, и будем изучать различные способы, предложенные до настоящего времени для развития движущей силы тепла»<sup>2</sup>. Смысл подобных замечаний был раскрыт в опубликованных после смерти Сади Карно отрывках из его дневника: «Тепло не что иное, как движущая сила или, вернее, движение, изменившее свой вид, это движение частиц тел; повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Обратное: всегда при исчезновении тепла возникает движущая сила. Таким

---

<sup>1</sup> Phil. Mag., (3), 33, 313, 1848.

<sup>2</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 30.

образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве, она, собственно говоря, никогда не создается, никогда не уничтожается, в действительности она меняет форму, т. е. вызывает то один ряд движения, то другой, но никогда не исчезает»<sup>1</sup>.

Карно не только пришел к мысли об эквивалентности теплоты и механической работы как форм движения, но даже установил механический эквивалент тепла — именно тепла, а не тепла, помноженного на температуру. Работа подъема кубического метра воды (т. е. 1000 кг) на высоту одного метра эквивалентна 2,7 кал. Такое соотношение означает, что калория эквивалентна 370 кгм. В заметках говорится:

«Согласно некоторым составившимся у меня представлениям о теории теплоты, для получения единицы работы (1000 кгм) необходимо потребить 2,70 тепловых единиц... Можно поэтому установить общее положение, что движущая сила в природе есть величина неизменная, что она, строго говоря, не создается и не разрушается»<sup>2</sup>.

Механическая теория тепла и закон сохранения энергии были установлены в сороковые годы XIX в. в ряде работ Роберта Майера и некоторых других физиков. Остановимся на содержании статей Майера «О количественном и качественном определении силы» (1841 г.), «Замечания о силах неживой природы» (1842 г.), «Органическое движение в связи с обменом веществ» (1845 г.) и «О механическом эквиваленте тепла» (1851 г.).

В работах Майера основой установления механического эквивалента тепла служат определенные эксперименты, определенные измерения температуры, теплоемкости и других физических величин. Статьи Майера указывают, однако, не только на определенные эксперименты и измерения, лежащие в основе первого начала термодинамики. Они указывают и на «априорные» корни механической теории теплоты, т. е. на общие принципы — обобщение неопределенно большой массы практических наблюдений, научных экспериментов и измерений. В этом смысле Майер действительно отличается от Джоуля и других экспери-

---

<sup>1</sup> С. Р., 87, 967, 1878.

<sup>2</sup> Там же.

ментаторов, которые, впрочем, и сами не были абсолютными эмпириками.

Если говорить о творческом пути Майера, приведшем его к открытию первого начала термодинамики, то следует сказать, что логика экспериментальных открытий не была исходным пунктом этого пути. Эмпирические наблюдения, толкнувшие Майера к размышлениям об эквивалентности тепла и работы, были случайными, недостоверными и не могли привести к однозначным выводам. Их нельзя смешивать с необходимыми, достоверными, лежавшими на главном фарватере научного прогресса и исторически связанными с изучением паровой машины, классическими измерениями тепловых величин, измерениями, положенными Майером в основу вычисления механического эквивалента тепла. Эти измерения были основой теории в логическом и историческом смысле. Иными были эмпирические истоки теории в биографическом и психологическом смысле. Майер впервые пришел к мысли об эквивалентности работы и тепла во время путешествия на Восток в качестве корабельного врача. Старый рулевой рассказывал ему, что море нагревается после бури. Затем в Батавии, ухаживая за больными матросами, Майер обнаружил, что в тропиках венозная кровь светлее, чем в наших широтах. Местный врач рассказал ему, что это обычное явление. Отсюда Майер заключил, что при высокой температуре воздуха окисление, создающее необходимую для организма теплоту, меньше, и поэтому углекислоты в крови также меньше. Именно в этот момент, как рассказывал Майер, его осенила мысль, что теплота и работа могут взаимно трансформироваться одна в другую.

Если ньютоново яблоко — не апокриф, то здесь — некоторая аналогия. Во времена Майера было не так много эмпирических доказательств превращения движения в теплоту, как во времена Ньютона — доказательств тяготения, но все же их было достаточно; не хватало скорее точных количественных соотношений. Тем не менее Майер психологически исходил из случайного факта. Кстати, наблюдения Майера не слишком известны поныне. «Достоверны ли, — пишет Мейерсон, — эти два факта, констатация коих предшествовала рождению открытия Майера? Чрезвычайно забавно, что можно вообще задавать такой вопрос, так как сколько бы мы не читали руководств по термодинамике

(науке, которой это открытие послужило основой), нигде мы не встретим ни малейшего намека ни на температуру моря, ни на цвет крови в тропиках, а доказательства сохранения энергии выводятся совершенно иным путем»<sup>1</sup>.

Наблюдения корабельного врача сыграли роль катализатора, способствовавшего синтезу теплотехнических и термодинамических данных с общими идеями, но не вошедшего в результат синтеза — классическую термодинамику.

Каковы же были исходные, общие идеи Майера?

Уже первая фраза статьи «О количественном и качественном определении силы» вводит нас в круг этих идей. Наряду с экспериментальными данными в основе закона превращения энергии лежит идея причинности — обобщение всего содержания естествознания.

«Задача естествознания,— пишет Майер,— заключается в том, чтобы изучать явления как органического, так и неорганического мира в отношении их причин и следствий. Все явления или процессы основываются на том, что вещества, тела изменяют то взаимоотношение, в котором они находятся друг к другу. В согласии с законом логического основания мы допускаем, что это происходит не без причины, и такую причину мы называем силой»<sup>2</sup>.

Далее идет несколько неясная формулировка понятия потенциальной энергии. «Мы можем вывести все явления из некоторой первичной силы, действующей в направлении уничтожения существующих разностей и объединения всего сущего в одну однородную массу в одной математической точке. Два тела, между которыми имеется данная разность, могли бы оставаться по удалении этой разности в состоянии покоя, если бы силы, которые были им сообщены для выравнивания разности, могли перестать существовать; но если принять, что они неуничтожаемы, то продолжающие еще действовать силы как причины изменения отношений снова восстановят существовавшую первоначальную разность. Таким образом, принцип, согласно которому раз данные силы количественно неиз-

---

<sup>1</sup> E. Meyerson. Du cheminement de la pensée. I. Paris, 1931, p. 234.

<sup>2</sup> Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 61.

менны, подобно веществам, логически обеспечивает нам продолжение существования разностей, а значит, и материального мира»<sup>1</sup>.

Под «пространственной разностью» Майер подразумевает потенциальную энергию груза, поднятого на известную высоту. В письме к Бауру, написанном в сентябре 1841 г., Майер рассматривает это понятие так, что не остается никакого сомнения в тождестве «пространственной разности» и потенциальной энергии.

«Пространственную разность» Майер рассматривает как причину движения (ускорения):

«Пусть два изолированных во Вселенной тела обладают некоторой данной разностью по отношению друг к другу; в таком случае они начнут двигаться по прямому направлению друг к другу. Последняя причина сил или причина, проявляющаяся в выравнивании существующих разностей, сообщает обоим телам движущую силу, следствием или явлением которой для нас является движение»<sup>2</sup>.

Последнее, по мнению Майера, количественно определяется произведением массы на скорость. Майер вскоре отказался от этой мысли и пользовался в качестве меры движения произведением массы на квадрат скорости. Из законов падения следовало, что кинетическая энергия тела пропорциональна квадрату скорости. В письме к Бауру в июле 1842 г. Майер показывает, что картезианская мера движения в применении к падению тел приводит к абсурду. Основная проблема, которую Майер разрешает в своей первой статье, состоит в следующем: куда переходит энергия движущегося тела при неупругом ударе. В случае упругого удара энергия сохраняется в дальнейшем движении столкнувшихся тел. По мере уменьшения упругости последовательно возрастает та доля движения, которая видимым образом прекращается, а при полной неупругости движение исчезает полностью. Это исчезающее движение Майер называет нейтрализованным. В случае абсолютной неупругости тел нейтрализованное движение целиком равно первоначальному. Майер рассматривает столкновение движущихся неупругих тел под углом и

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 61—62.

<sup>2</sup> Там же, стр. 63.

доказывает, что в данном случае часть движения переходит в теплоту. «Движение переходит в теплоту благодаря тому, что оно нейтрализуется противоположным движением или какой-нибудь неподвижной точкой; образовавшаяся теплота пропорциональна исчезнувшему движению»<sup>1</sup>. В свою очередь теплота переходит в движение, та как она расширяет тела. При этом возникают противоположные друг другу радикальные движения.

Статья «О количественном и качественном определении силы» не была напечатана в «Анналах» Поггендорфа, и ее разыскали в архиве лишь 36 лет спустя. Второй (первый напечатанный) документ истории закона превращения энергии — статья Майера «Замечания о силах неживой природы» появилась в печати в 1842 г.

Статья эта, как и первая, начинается ссылкой на закон причинности. Из него следует, что к силам целиком относятся правила количественной эквивалентности причины и действия. Сохранение силы прямо вытекает из неразрушимости причин. «В цепи причин и действий не может, как это вытекает из природы уравнения, когда-либо один член или часть какого-либо члена сделаться нулем. Это первое свойство всех причин мы называем их неразрушимостью»<sup>2</sup>.

Когда причина вызывает равное действие, сама она перестает существовать. Иными словами, она превращается в свое действие. Поэтому причинам свойственна наряду с неразрушимостью вторая особенность — способность принимать различные формы. Причины определяются Майером, как неразрушимые и превращаемые объекты. Причины могут быть весомыми и непроницаемыми субстанциями — материальными телами, либо объективными, но невесомыми, способными к превращению силами. Майер рассматривает первый класс причин. Он берет в качестве примера гремучий газ и воду. Существование гремучего газа есть причина последующего появления воды. Количество воды соответствует количеству гремучего газа. Однако при образовании воды выделяется значительное количество тепла. Это тепло представляет собой

---

<sup>1</sup> Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 69.

<sup>2</sup> Там же, стр. 76.

невесомый объект — силу, которая также должна иметь некоторую причину. Следовательно, реакция взрыва гремучего газа должна быть описана формулой: водород плюс кислород, плюс некоторая причина теплоты равняется воде плюс теплота. Теория флогистона, — говорит Майер, — установила закономерное отношение между теплотой и ее гипотетическим истоком, назвав последний флогистон. Ошибка теории флогистона состоит в том, что причину теплоты она поставила рядом с химическими веществами и говорила о потере флогистона вместо того, чтобы говорить о присоединении кислорода. Рациональная химия, продолжает Майер, устанавливает соотношение между весовыми причинами и их весовыми действиями. Если между весовыми субстанциями, участвующими в химических реакциях, полностью осуществляется принцип эквивалентности причин и действия, то для невесомых субстанций — сил, должны быть установлены особые эквивалентные связи.

«Если причиной является вещество, то и в качестве действия получается также таковое же, если же причиной является некоторая сила, то в качестве действия будет также некоторая сила»<sup>1</sup>.

Отчетливая и явная связь понятий сохранения и причинности придает значительный эпистемологический интерес той конкретной форме, в которой Майер высказал первое начало термодинамики в «Замечаниях о силах неживой природы». Из невозможности действия без причины и причины без действия выводится однозначная определенность действия. Понятие причины означает нечто, полностью определяющее действие. Поэтому *causa aequat effectum* — причина равна действию. Смысл понятия равенства применительно к причине и действию представляет собой серьезную логико-эпистемологическую проблему, неоднократно обсуждавшуюся в философской литературе. Если причина и действие абсолютно тождественны, то никаких процессов в природе, состоящей из причин и действий, нет, да и самой природы нет: все материальные точки тождественны в пространстве, и природа имеет точечные размеры. Природа, кроме того, существует лишь один момент, если все в ней тождественно по

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 78.

времени. Поэтому под причинной связью подразумевается связь между неодновременными событиями. Чем же отличаются друг от друга одновременные события? Механика сводит их различие к различию конфигураций системы, т. е. положений материальных точек в различные моменты времени. Механическое естествознание отрицает изменение неподвижного тела. Для механики всякое изменение сводится к процессу, описываемому формулой  $x = f(t)$ , где  $x$  — расстояние от точки отсчета, а  $t$  — время. Неподвижное тело не имеет меняющихся предикатов. Если взять четырехмерный пространственно-временной континуум, то мировая линия, направленная вдоль временной оси, изображает в механике не только покой, но и вообще полную неизменность. Статистическая физика меняет дело. Изменение состояния может происходить в неподвижном теле, и мы не сводим это изменение к перемещениям отдельных частиц, так как статистический подход как раз и заключается в игнорировании этих перемещений, в учете лишь их макроскопического результата. Здесь мы забежали вперед, но это было необходимо для выяснения смысла понятий энергии и ее сохранения. У Майера понятие изменения энергии («силы») включало изменение количества тепла, измеряемое при заданной теплоемкости температурой тела. Это — процесс немеханического изменения, изменения во времени, которое непосредственно нельзя свести к изменению координат.

Майер сообщил непосредственный физический смысл понятию времени (так же как Карно — направлению времени). Смысл этот состоит в изменении физического состояния в одной и той же области пространства. Майер сопоставил с таким немеханическим изменением механическое изменение, т. е. изменение положения в пространстве неизменных в других отношениях объектов. Что же является сохраняющейся величиной при переходе от одного из сопоставленных процессов к другому? Такую величину Майер и называет силой. Следовательно, «сила» — это величина, переходящая от причины к действию, когда причина и действие имеют различную природу: в одном случае — механическое изменение положения, в другом — физическое изменение состояния, описываемое мировой линией, направленной вдоль временной оси. Импульс  $mv$  не может быть мерой «силы» при подобном переходе: им-

пульсом обладают лишь перемещающиеся тела. Более общее понятие движения, включающее и изменение неподвижного (при игнорировании отдельных внутренних движений) тела, должно измеряться другой величиной — «силой» в лейбницевои смысле.

Таков выяснившийся гораздо позже смысл понятия причины у Майера. Причинная связь соединяет процессы, различные по своей природе. Отсюда и выводится размерность сохраняющейся величины.

Сила в том смысле, в каком этот термин понимается Майером, представляет собой энергию. Соответственно, сила в ньютоновом понимании именуется свойством.

Разграничение силы (лейбницевои силы) и свойства (ньютоновои силы) подробнее изложено в статье Майера «Органическое движение в связи с обменом веществ». Майер ссылается в этой статье на VIII определение в ньютоновых «Началах». Напомним, что там дано определение движущей величины центростремительной силы, которая соответствует современному понятию силы. В конце определения говорится, что выражения «притяжение» и «импульс» можно употреблять безразлично, так как вид силы рассматривается не физически, а математически. По мнению Майера, восьмое определение Ньютона следует понимать таким образом, что сила тяготения соответствует ускорению и представляет собой чисто аналитическую характеристику движения в данной точке. Она пропорциональна производной по времени и поэтому не может характеризовать движение на конечном отрезке. Другое дело — физическая причина падения, равная произведению массы на квадрат скорости. Сейчас мы можем, заменив последнюю величину ее половиной, ясно увидеть, что «физическая» сила Майера совпадает с энергией, а «математическая» сила — с силой в современном смысле. По мнению Майера, основная ошибка последователей Ньютона состояла в том, что они отождествляли физическую и математическую силы, или, если пользоваться современными терминами, силу и энергию.

В статье «О механическом эквиваленте тепла» (1851 г.) Майер снова возвращается к понятию силы и энергии. Здесь он приравнивает «математическую» силу, характеризующую ускорение тела в данной точке — мертвои силе, а «физическую» силу, равную произведению (или

половине произведения) массы на квадрат скорости, — движущей силе. По мнению Майера, эти два понятия нельзя соединить некоторым общим родовым определением. «Простое давление (мертвая сила) и произведение давления на пространство действия (живая сила) слишком разнородные величины, чтобы их можно было объединить в одном родовом понятии»<sup>1</sup>.

Остается отнять название силы либо у ньютоновой категории, т. е. у мертвой силы, либо у лейбницевой живой силы. Майер избирает первый путь.

Историческое значение трактовки ньютоновых сил как «свойств» может быть понято с точки зрения противопоставления механики, в которой силы были основным и исходным понятием, и физики, в которой силовое поле подлежит объяснению с помощью новых понятий. Это противопоставление затруднено тем обстоятельством, что новое, скалярное понятие почти двести лет также именовалось силой. Лейбницева живая сила, имеющая размерность совсем иную, чем ньютонова «мертвая» сила, часто смешивалась с последней. Майер, как мы видели, не хотел сохранить не только одно и то же наименование для лейбницевой и ньютоновой сил, но даже представление о двух этих понятиях как видовых по отношению к общему родовому понятию «сила». Он оставил наименование «сила» для лейбницевой силы, считая ее фундаментальным понятием физики, и назвал ньютонову силу «свойством». Строгое разграничение указанных понятий могло быть дано много позже. В последующем развитии физики наименования Майера не сохранились; название силы осталось за ньютоновой силой, а лейбницева «живая сила» была названа энергией. Но сохранилось, было систематизировано и стало одним из оснований современной физики существенное содержание интуиции Майера — утверждение о фундаментальном характере понятия энергии по сравнению с понятием силы.

В «Замечаниях о силах неживой природы» Майер говорит о падении тяжелого тела и превращении энергии — механической работы в энергию — теплоту. Ход мыслей Майера в названной статье таков. Причиной подъема груза

---

<sup>1</sup> Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 247.

служит сила. Из этого вытекает, что поднятый груз также обладает силой. Иначе говоря, пространственную разность весовых объектов нужно называть силой, так как эта разность служит причиной падения тел. Ничего другого не следует подразумевать под выражением «сила падения». Сила падения и вызванное ею движение — это две силы, из которых первая — причина, а вторая — действие. Груз, опустившийся на Землю, не может служить силой: причина движения — не сам груз, а его расстояние от Земли. С этой точки зрения нельзя называть причиной падения тяжесть и говорить о некоторой постоянной силе тяготения, которая объясняет движение тел. Тяготение — это свойство; оно лишено неразрушимости и способности превращения. Между свойствами и движением не может быть установлено никакой эквивалентности. Если вопреки этому считать тяжесть причиной движения, то нарушается представление о количественной эквивалентности причины и действия, так как тяготение вызывает движение, не убывая. Отсюда следует, что причина падения тел состоит в потенциальной энергии, или, по терминологии Майера, в пространственной разности весовых объектов, в предварительном подъеме тяжелого тела.

Майер показал, что падение тела вызвано некоторой силой, исчезнувшей при падении и превратившейся в кинетическую форму. Далее ему остается показать, что, когда тело падает на Землю и, таким образом, видимое движение прекращается, энергия переходит в другую форму. Трение и удар, которыми оканчивается движение, вызывают нагревание тел. Это нагревание эквивалентно прекратившемуся движению.

«Мы повторяем, движение не может превратиться в ничто, и противоположные, или положительные и отрицательные, движения могут считаться равными нулю столь же мало, как могут возникнуть из нуля противоположно направленные движения или груз может сам себя поднять»<sup>1</sup>.

Таким образом, теплота — это сила, эквивалентная движению тела и, следовательно, эквивалентная силе падения. «Как возникает тепло в качестве действия при умень-

---

<sup>1</sup> Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 86.

шении объема и прекращающемся движении, так же исчезает тепло в качестве причины при появлении его действий — движения, увеличения объема, поднятия груза»<sup>1</sup>.

В водяных колесах поднятый груз (вода) падает на Землю, и это движение частично переходит в теплоту подшипников. Напротив, в паровых машинах теплота превращается в движение или поднятие груза. В локомотиве тепло превращается в движение, в то время как в его колесах и рельсах движение частично превращается в тепло. Здесь уместно сопоставить теорию Майера с теорией Карно (вернее, с теорией, изложенной в «Размышлениях о движущей силе огня», — в дневниках была иная теория). Исходной идеей Майера было сохранение вещества и сохранение энергии. Теория теплорода в той форме, в которой она высказывалась Карно, совместима с идеей сохранения вещества. В цикле, описанном Карно, теплород не превращается в механическую работу, в нее превращается движение неуничтожаемого теплорода. Специфическое вещество — теплород подчиняется закону сохранения вещества. Сложнее вопрос о сохранении энергии: необратимый переход тепла означает потерю способности производить работу; работа не создается из ничего, но может обратиться в ничто, так как теория теплорода закрывает дорогу к представлению о равномерно распределенной теплоте как эквиваленте работы и Клапейрон прямо допускал исчезновение работы. Вильям Томсон видел этот уязвимый пункт концепции Карно — Клапейрона<sup>2</sup> и вскоре пришел к иной концепции. Вопрос этот тесно связан с развитием второго начала термодинамики и его объединением с первым началом в единую непротиворечивую термодинамику Клаузиуса — Томсона.

Теория Майера полностью удовлетворяла не только принципу сохранения вещества, но и принципу сохранения энергии, потому что в ней не равномерное распределение тепла, но сама теплота, всякое количество теплоты независимо от его распределения эквивалентно работе. Зна-

---

<sup>1</sup> Р. М а й е р. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 84.

<sup>2</sup> Trans. Roy. Soc. of Edinb., 26, 541, 1849. См. также М. П л а н к. Принципы сохранения энергии. М.—Л., 1938, стр. 27.

чит, теплота изымается из числа неуничтожаемых веществ и становится формой неуничтожаемой энергии. Но отсюда следует, что само понятие энергии включает не только движение в обычном смысле (в том числе движение теплода из котла в конденсатор), но и теплоту, т. е. что это понятие выходит за пределы механики.

В конце «Замечаний о силах неживой природы» Майер говорит о механическом эквиваленте теплоты. В мире существуют три силы: сила падения, сила движения и теплота. Первые две измеряются одними и теми же единицами. Третья сила, теплота, должна измеряться ими же. В «Замечаниях о силах неживой природы» нет еще подробного расчета механического эквивалента тепла, но уже сообщается общая идея такого расчета. Майер исходит из эмпирически найденных значений теплоемкости при постоянном давлении и при постоянном объеме. Чтобы повысить температуру газа при постоянном давлении на один градус, нужно сообщить ему некоторое количество теплоты. При этом объем меняется и расширение газа производит известную работу. Чтобы повысить температуру на один градус при постоянном объеме, нужно иное количество теплоты. Разность между этими количествами (известное число калорий) эквивалентно работе (числу килограмм-метров), произведенной в первом случае. Это утверждение Майера (справедливое, как оказалось впоследствии, для идеальных газов) и легло в основу вычисления механического эквивалента теплоты.

«Применяя установленные положения к тепловым и объемным отношениям разных газов,— пишет Майер,— найдем, что опускание сжимающего газ столба ртути равно развиваемому в результате сжатия количеству тепла, и отсюда получается,— если положить отношение коэффициентов теплоемкости атмосферного воздуха при постоянном давлении и при постоянном объеме равным 1,421,— что опусканию единицы веса с высоты около 356 м соответствует нагревание равного веса воды от 0 до 1°»<sup>1</sup>.

Коэффициент полезного действия тепловых машин показывает, что лишь небольшая часть тепла используется

---

<sup>1</sup> Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 86.

для поднятия грузов или движения, и «это могло бы служить оправданием для попыток представить себе выгодный путь получения движения иным способом, чем посредством использования химической разности между С и О, а именно — посредством превращения в движение электричества, полученного химическим путем»<sup>1</sup>.

Подчеркнем теперь очень важную для истории физики особенность «Замечаний о силах неживой природы» и последующих работ Майера. Мыслитель, открывший принцип превращения энергии, нигде не говорит о теплоте как о движении. Он обходит вопрос о сущности теплоты и не строит каких-либо кинетических гипотез в этой области. Гораздо важнее другое: теория Майера и не требовала кинетических гипотез. Впоследствии выяснилось, что феноменологическая термодинамика для однозначных ответов требует некоторых допущений, основанных на кинетической теории газов. Но в сороковые годы, когда Майер высказал свои основные идеи, требовалось только одно — допустить возможность перехода теплоты в движение. Представления Майера о причинности и сохранении не требовали идеи тождества действия и количественно эквивалентной ему причины. Такая идея, как мы видели, является одной из основных идей механистического мировоззрения XVIII в. Передовые мыслители XVIII столетия, следуя картезианской традиции, рисовали Вселенную, в которой нет ничего, кроме частиц, подчиненных в своем движении тем же законам, что и макроскопические тела. В кинетических теориях XVIII в. молекулярное движение, тождественное с макроскопическим, было сущностью теплоты, и, следовательно, эквивалентность теплоты и макроскопической работы означала тождественность причины и действия. Майер выражал новую, специфическую для XIX в. тенденцию, антимеханистическую по своей сущности и исторической роли. Именно поэтому открытие Майера стало основным физическим знаменем «Диалектики природы», направленной в силу определенных исторических причин в первую очередь против всякой метафизики и, в частности, против метафизического увековечивания механистического естествознания XVIII в.

---

<sup>1</sup> Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 86.

Феноменологическая позиция Майера в отношении теплоты была исторически оправдана последующей кинетической интерпретацией первого начала термодинамики. Во второй половине столетия была разгадана статистически-кинетическая природа теплоты, и это не было простым возвратом к кинетическим идеям XVIII в., так как в новых воззрениях сначала неявно (у Клаузиуса), а затем и явно (у Максвелла и Больцмана) фигурировало новое понятие движения, нетождественного макроскопическому по управляющим им законам. Но, когда Майер писал свои «Замечания о силах неживой природы», движение понимали в ограниченно-механическом смысле. Позиция Майера в большой степени открывала двери новой концепции движения, включающего формы, нетождественные механическому движению. Тут имели значение и внутренняя логика физической теории (вычисление механического эквивалента тепла не требовало определенных кинетических представлений о природе тепла), и общие идеи Майера (нетождественность количественно эквивалентных «сил»).

Отсутствие кинетических представлений о теплоте в работах Майера отнюдь не было, таким образом, случайным пробелом. Напротив, механическая теория тепла не могла бы появиться без некоторого условного — относительного и временного — представления о немеханическом характере теплоты. Термины «механический» и «немеханический» нуждаются здесь в пояснениях. Когда говорят о механической теории теплоты как исторической основе принципа сохранения энергии в работах Майера, то слово «механическая» обозначает нечто совсем иное, чем то же слово, примененное к кинетическим теориям XVIII в., и чем то же слово, примененное к кинетической теории Больцмана. В теориях XVIII в. постулировалась тождественность механических законов, управляющих макроскопическими телами, и законов движения невидимых частиц. Законы эти формулировались с помощью одних и тех же переменных. Уравнение, связывающее макроскопические величины (живые силы макроскопических тел, теряющиеся при неупругом ударе) и микроскопические величины (живые силы молекул), могло бы содержать, с одной стороны, макроскопическую величину, а с другой, — гигантское количество (порядка  $10^{26}$ ) величин, вычисляемых с

помощью столь же необъятного числа уравнений движения молекул и начальных условий. Этот невозможный (и ненужный) аппарат соответствовал бы понятию механической теории в смысле XVIII в.

У Майера механическая теория тепла означает существование механического эквивалента, сопоставляемого немеханической величине, вернее переменной, в выражение которой входит немеханическая величина (температура). Генезис термодинамики мог произойти лишь в подобной феноменологической форме. Только после этого задачей физики стало объединение феноменологической термодинамики с кинетическим представлением о теплоте. Объединение было произведено Клаузиусом, Томсоном, Максвеллом и главным образом Больцманом. У последнего механическая теория теплоты означает не непосредственное тождество механических закономерностей макро- и микромира, как в XVIII в., и не феноменологическое сопоставление макроскопической немеханической величины (количества теплоты) макроскопической динамической переменной (работе), как у Майера, а статистическую связь между механикой обратимых молекулярных движений и поведением ансамблей, статистическую интерпретацию немеханических понятий температуры и включающих ее выражений.

Очерченное развитие физических идей в зародыше содержалось в «Замечаниях о силах неживой природы». В дальнейшем Майер изложил принцип превращения энергии в статье «Органическое движение в связи с обменом веществ». Эта статья была написана в 1844 г. и послана в либиховские «Анналы». Либих не хотел печатать чисто физическую работу Майера, и в конце концов она вышла отдельным изданием.

В начале статьи «Органическое движение в связи с обменом веществ» Майер ставит широкую задачу — объединить естественнонаучные знания единым принципом. «Конечно, если бы мы имели дело с попыткой построения мира а priori, то это можно было бы назвать возвратом к ошибкам античного естествознания или к заблуждениям современной натурфилософии; однако, если бы удалось связать между собой бесчисленные явления природы и из них вывести одно верховное основоположение, едва ли можно было бы упрекнуть нас за то, что мы после тща-

тельной проверки воспользовались бы таковым основоположением как компасом, под надежным руководством которого нам было бы легче продвигаться в море единичных фактов»<sup>1</sup>.

Майер указывает на многовековой научно-технический опыт, демонстрирующий превращение тепла в движение.

«Опыт везде показывает нам превращение механического эффекта в тепло. Относящиеся к этому факты, как например, образование тепла при ударе или трении, известны издавна; но разве от этого они менее убедительны? Стоит лишь пойти и понаблюдать нагревание больших жерновов и муки на мучной мельнице, нагревание красильного дерева на краскотерной фабрике, постоянное образование тепла па оси всякого рода движущихся колес, стоит только припомнить опыт Румфорда — повсюду одно и то же явление: неограниченное образование тепла при затрате механического эффекта»<sup>2</sup>.

Однако гораздо важнее обратный переход тепла в механическую работу. Майер говорит о теории тепловых двигателей, и здесь яснее чем где-нибудь высказана историческая связь между паровой техникой и принципом сохранения и превращения энергии. «В течение тысячелетий человечество стремилось к разрешению всегда одной и той же задачи: привести в движение покоящуюся массу вспомогательными средствами неорганической природы, ограничиваясь почти исключительно применением данных механических эффектов. Новому времени выпало на долю к силам старого мира — движущемуся воздуху и падающей воде — присоединить еще одну новую силу. Этой новой силой, на действия которой с удивлением смотрят люди нашего столетия, является тепло»<sup>3</sup>.

Для вычисления механического эквивалента тепла в работе «Органическое движение в связи с обменом вещества» Майер сравнивал тепло, которое переходит в скрытое состояние, с механической работой расширяющегося при этом под некоторым давлением газа. «Если тепло, которое получает газ, нагреваясь при постоянном объеме до  $t^{\circ}$ , равно  $x$ , тепло же, необходимое газу для такого же

<sup>1</sup> Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 90.

<sup>2</sup> Там же, стр. 113.

<sup>3</sup> Там же, стр. 97—98.

повышения температуры при постоянном давлении, равно  $x + y$  и если, далее, вес, поднятый в этом последнем случае, равен  $P$ , а высота его подъема равна  $h$ , то тогда  $y = Ph$ »<sup>1</sup>.

В указанной работе Майер подставляет в эту формулу значения, найденные Дюлонгом, и приходит к выводу, что нагревание  $1 \text{ см}^3$  на один градус соответствует подъему одного грамма на  $367 \text{ м}$ . Впоследствии, воспользовавшись более точными исследованиями Реньо, Майер пришел к цифре  $425 \text{ м}$  ( $1308 \text{ футов}$ ) — высоты, на которую нужно поднять  $1 \text{ г}$ , чтобы затраченная механическая работа соответствовала нагреванию  $1 \text{ см}^3$  воздуха на один градус. «Мы только что видели, что для поднятия тяжести в  $1 \text{ килограмм}$  на  $425 \text{ метров}$  требуется одна единица тепла, или, как можно было бы еще сказать, для поднятия тяжести в  $1 \text{ грамм}$  требуется  $1^\circ$  тепла, отсюда следует, что тяжесть в  $1 \text{ килограмм}$ , падающая с высоты в  $425 \text{ метров}$ , должна освободить посредством удара одну единицу тепла (калорию)»<sup>2</sup>.

Первое начало термодинамики полностью содержалось в работе Майера  $1842 \text{ г}$ . Однако Майер был далек от строгой и законченной математической формы, какую первое начало термодинамики приобрело у Гельмгольца, и не пользовался термином «энергия», введенным Ранкиным в  $1853 \text{ г}$ . Тем не менее коренной переворот в научном мировоззрении начался именно с работы Майера.

Переворот был действительно коренным. Он неизбежно должен был поколебать механическое представление о природе. Для такого представления исходными понятиями служат координаты и изменения координат себетожественных тел. В число последних входил и теплород. В ряде теорий, в особенности поздних, понятие теплорода не противоречило общим предпосылкам механического естествознания. Явным образом механическую тенденцию выражали кинетические концепции теплоты, противостоявшие в XVII—XVIII вв. теории теплорода. Здесь речь шла о движении невидимых частиц, по существу

---

<sup>1</sup> Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 103.

<sup>2</sup> Там же, стр. 108—109.

тождественном макроскопическому движению. Теория теплорода переносила всю иррациональность в учение о веществе, где нельзя было механическим (с позиций естествознания того времени — единственно рациональным образом) объяснить специфичность теплорода. Но учение о движении было вполне механическим; теплород перемещался из котла в конденсатор так же, как любое тело из одной области пространства в другую. Кинетическая атомистика XVII—XVIII вв. так же переносила иррациональность в учение о веществе: качественные различия и состояния макроскопических тел были объяснены движением невидимых частиц, но оставалось неясным различие между бескачественным веществом, из которого состоит частица, и окружающим пространством. Само движение было вполне рациональным с позиций механического естествознания: себетождественная частица с течением времени меняет координаты.

Иное дело — теория теплоты второй половины XIX в. Здесь нет перемещающегося теплорода. Нельзя свести изменение состояния макроскопического тела и к перемещению отдельных частиц. Значит, здесь нельзя сводить изменения себетождественного объекта к изменению координат, т. е. относительного положения в пространстве, при неизменности абсолютных свойств. Значит, свойства, системы, выраженные через скалярные, инвариантные, абсолютные величины, уже не сводятся к координатным, относительным свойствам и приобретают самостоятельную реальность. Тем самым в физику входит макроскопическое тело как нечто, несводимое (статистически сводимое) к микроскопическим телам, и макроскопическое состояние, несводимое (статистически сводимое) к микроскопическим состояниям — положениям и скоростям частиц.

Эта точка зрения сразу показала свою плодотворность. Можно было без сведения теплоты, электричества, магнетизма и химических сил к механическому движению установить связь между всеми силами природы.

В заключительных строках работы «Органическое движение в связи с обменом веществ» Майер полностью отбрасывает гипотезу невесомых тепловых и электрических флюидов. «Ибо разве не было бы совершенно бессмысленным искать природу движения и пространственного расстояния между массами в невесомой жидкости или

стремиться установить попеременно то материальное, то нематериальное бытие одного и того же объекта?

«Выскажем великую истину: «Не существует никаких нематериальных материй». Мы прекрасно сознаем, что мы ведем борьбу с укоренившимися и канонизированными крупнейшими авторитетами гипотезами, что мы хотим вместе с невесомыми жидкостями изгнать из учения о природе все, что осталось от богов Греции, однако мы знаем также, что природа в ее простой истине является более великой и прекрасной, чем любое создание человеческих рук, чем все иллюзии сотворенного духа»<sup>1</sup>.

Майер обосновывает эквивалентность тепла и механической работы преимущественно принципиальными доводами. Другим, по преимуществу экспериментальным путем, шел Джоуль. В 1843 г. он опубликовал результаты экспериментов, которые должны были подтвердить превращение механической силы в теплоту и их количественную эквивалентность. Джоуль измерял количество теплоты, выделившееся в цепи электромагнитного генератора. Оказалось, что теплота находится в постоянном отношении к затраченной механической работе. Джоуль проделал и обратный эксперимент. «Из этих опытов,— пишет Джоуль,— вытекал совершенно ясный вывод, что теплота и механическая сила обратимы одна в другую и, следовательно, столь очевидно, что теплота является либо живой силой, либо некоторым состоянием притяжения или отталкивания, способным порождать живую силу»<sup>2</sup>.

Джоуль измерял также теплоту, вызванную трением жидкости. При этом оказалось, что развивающаяся теплота не зависит от природы применяемых жидкостей (Джоуль брал воду, масло и ртуть), и при всех условиях количество теплоты, которое поднимало на один градус температуру фунта воды, было эквивалентно механической силе, развиваемой грузом в 772 фунта при падении с высоты одного фута.

Далее Джоуль определил, как изменяется температура атмосферного воздуха при его разрежении и сжатии. Нагревание воздуха при его сжатии было известно давно.

<sup>1</sup> Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 130.

<sup>2</sup> «Основатели кинетической теории материи». Сборник статей М.—Л., 1937, стр. 34.

Старая теория объясняла этот факт уменьшением теплоемкости воздуха при сжатии. Джоуль несколькими простыми экспериментами доказал, что такая концепция не может объяснить количественных соотношений между сжатием воздуха и его температурой. Если температура повышается благодаря уменьшению теплоемкости, то можно ожидать, что некоторый объем воздуха будет освобождать столько же энергии при сжатии, сколько будет поглощено впоследствии при его расширении до первоначального объема. Однако в действительности при обратном процессе, когда воздух выходил через кран в атмосферу, поглощалось гораздо меньше тепла. Когда газы выходили не в атмосферу, а в пустоту, вообще не наблюдалось никакого охлаждения (еще раньше это установил Гей-Люссак). С точки зрения новой теории они были легко объяснимы. Теплота, выделившаяся при сжатии воздуха, была эквивалентна механической силе, затраченной на сжатие. Наоборот, теплота, поглощенная при разрежении воздуха, была эквивалентна совершенно другой величине, а именно механической работе, необходимой для смещения определенного столба атмосферного воздуха. Когда сжатый воздух выходил в пустоту, то он практически не производил механической работы и, соответственно, не было поглощения теплоты. Результат, полученный Джоулем, позволял яснее представить процессы, происходящие в паровых машинах.

«Изложенные принципы привели, конечно, к более близкому ознакомлению с правильной теорией паровой машины, так как они дали нам возможность оценить тепловой эффект от трения пара при прохождении его через различные клапаны и трубки, равно как от трения поршня о стенки цилиндра; они же уяснили нам, что пар во время своего расширения в цилиндре теряет теплоту в количестве, точно пропорциональном произведенной механической работе»<sup>1</sup>.

Джоуль был прежде всего экспериментатором, но он не был эмпириком. Он выдвинул одну из первых гипотез о характере молекулярных движений, связанных с теплотой. Первоначально Джоуль представлял себе, что атомы вещества окружены некоторой электрической атмосферой,

<sup>1</sup> «Основатели кинетической теории материи», стр. 35.

которая вращается вокруг них, причем скорость наружных слоев соответствует температуре.

Впоследствии он заменил эту гипотезу другой. В работе, опубликованной в 1851 г., Джоуль характеризует тепловое движение частиц, как прямолинейное перемещение во всех направлениях, причем температура соответствует живой силе этих молекулярных движений. Эту физическую картину Джоуль развивает применительно к газам, строя, таким образом, кинетическую теорию газов.

Мейерсон очень убедительно показывает, что Джоуль в действительности исходил не только из экспериментальных данных, но и из предшествовавшего опытам убеждения о неразрушимости движения. «Когда опыты были сделаны, а их результаты... разошлись между собой, то Джоуль вместо того, чтобы заключить отсюда, что это отношение было не постоянным, а изменчивым, вывел среднее, и это среднее он принял за реальную величину упомянутого отношения, ясно, что он заранее был убежден в его постоянстве»<sup>1</sup>.

Это априорное убеждение в неразрушимости силы вытекает у Джоуля, так же как и у Майера, из принципа причинной связи. Но Джоуль считает нужным облечь эту идею в теологическую форму: «Мы могли бы вывести a priori, что такое абсолютное разрушение живой силы не может иметь места, ибо было бы, очевидно, абсурдным предположить, что силы, которыми бог одарил материю, могут быть разрушены или созданы действием человека; но мы обладаем не одним только этим аргументом, как ни должен он казаться решающим всякому уму, свободному от предрассудков»<sup>2</sup>.

Работы датского инженера Кольдинга, разделяющего с Майером и Джоулем честь открытия механической теории тепла, содержат и натурфилософские соображения о сохранении движения, и результаты экспериментов. Философское обоснование неуничтожаемости сил носит у Кольдинга достаточно схоластический характер. «Так как силы,— пишет Кольдинг,— суть существа духовные и нематериальные, так как они суть сущности, которые

---

<sup>1</sup> Э. Мейерсон. Тожественность и действительность. СПб., 1912, стр. 210.

<sup>2</sup> Phil. Mag. 23, 445, 1843.

становятся нам известны только благодаря их господству над природой, то эти сущности должны быть, конечно, гораздо выше всякой существующей материальной вещи. И так как очевидно, что та мудрость, которую мы замечаем и которой мы удивляемся в природе, выражается лишь при помощи сил, то последние должны находиться в связи с духовной силой нематериальной и интеллектуальной, которая руководит прогрессом природы. Но если дело обстоит так, то решительно невозможно представить себе, чтобы эти силы были чем-нибудь тленным или смертным. Без сомнения, их нужно рассматривать, как вечные». «Таким образом,— замечает Мейерсон,— Кольдинг полагает что достаточно установить высокую важность понятия о силе, достаточно, так сказать, возвысить его ранг, чтобы вывести, что сила должна быть субстанцией, что она должна сохраняться»<sup>1</sup>.

Исходя из этих посылок, Кольдинг считает необходимым распространить принцип сохранения механических сил на все химические и физические процессы. Он хотел обнародовать свои соображения, ограничившись лишь их философским обоснованием. Но по совету Эрстеда Кольдинг занялся экспериментальными доказательствами. В приборе, построенном Кольдингом, тела с различной скоростью двигались по металлическим, деревянным и другим поверхностям и при этом измерялась теплота, возникавшая благодаря трению. Кольдинг произвел около 200 опытов и получил результаты, которые мало отличались друг от друга.

Цикл открытий сороковых годов был в известной мере завершен докладом Гельмгольца «О сохранении силы», прочитанном 23 июля 1847 г. в Физическом обществе в Берлине<sup>2</sup>. Гельмголец исходит из принципа причинности. Процессы, происходящие в природе, должны иметь причины. Последние могут быть неизменны; таковы — центральные силы притяжения и отталкивания, которые не зависят от других причин и являются конечным пунктом в научном объяснении природы. Если же ближайшие причины явлений сами изменчивы и не подчинены неизменному закону, то исследование должно продолжаться дальше,

<sup>1</sup> «Гожественность и действительность», стр. 212.

<sup>2</sup> H. Helmholtz. Über die Erhaltung der Kraft. Berlin, 1847.

пока не придем к последним неизменным причинам. Для Гельмгольца задача науки состоит в объяснении явлений с точки зрения механической причинности, именно на основе центральных сил. В последнем счете элементы мира могут лишь передвигаться, т. е. изменять расстояние между собой, приближаться или удаляться друг от друга, притягивать или отталкивать друг друга.

Силы, действующие между массами, разлагаются на силы, действующие между материальными точками. «Но между точками нет иных взаимных пространственных отношений, кроме их расстояния, так как направление соединяющей их линии может быть определено не иначе, как в отношении по крайней мере к еще двум другим точкам. Поэтому сила движения между двумя точками может быть также только причиной изменения их взаимного расстояния, т. е. быть силой притяжения или отталкивания. Это следует также прямо из закона достаточного основания. Силы, действующие между двумя массами, необходимо должны быть определены по своей величине и направлению, как только положение масс полностью дано. Но две точки определяют вполне одно направление, а именно — направление соединяющей их линии; следовательно, силы, действующие между точками, должны быть направлены по этой прямой и их интенсивность должна зависеть только от расстояния. Таким образом, окончательно задача физических наук о природе заключается в том, чтобы явления природы свести к неизменным притягательным и отталкивательным силам, величина которых зависит от расстояния»<sup>1</sup>.

В мире, где материальные точки связаны между собой центральными силами, объясняющими все движения точек, живая сила последних сохраняется. Это давно было известно. Гельмгольц доказывает обратный тезис: из сохранения всех сил можно вывести центральный характер элементарных сил, действующих между материальными точками. Сохранение живых сил может быть при этом выражено в виде невозможности вечного двигателя. Гельмгольц рассматривает систему взаимодействующих тел. Тела под действием сил движутся и достигают известных скоростей. Движения с этими скоростями могут вновь произ-

---

<sup>1</sup> H. Helmholtz. Über die Erhaltung der Kraft. Berlin, 1847.

вести работу, затраченную на приведение тел в движение и достижение этих скоростей. Чтобы силы взаимодействия снова произвели ту же самую работу, необходимо вернуть систему в первоначальное состояние. Для этого нужно приложить к телам некоторые силы и затратить известную работу. «В данном случае то количество работы, которое получается, когда тела системы переходят из начального положения во второе, и количество работы, которое затрачивается при их обратном переходе из второго положения в первое, всегда одно и то же, каким бы способом, по какому бы пути, или с какой бы скоростью этот переход ни был совершен»<sup>1</sup>. Из этого принципа вытекает центральный характер сил, если дополнительно допустить, что все силы складываются из сил, действующих между материальными точками.

Равенство работы сил, приведших систему к некоторому новому положению, и работы, необходимой, чтобы вернуть ее в первоначальное положение, означает, что живая сила  $L$  равна работе  $A$ , произведенной действующими силами (в результате которой система достигла определенных скоростей и соответственно живой силы), плюс некоторое постоянное количество работы:

$$L = A + \text{const.}$$

Гельмгольц заменяет работу  $A$  некоторым количеством сил на протяжении  $U$ , которое по величине равно работе  $A$ , но имеет противоположный знак. Тогда:

$$L + U = \text{const.}$$

Эту постоянную сумму Гельмгольц называет силой, — разумеется, не в ньютоновском смысле действующей силы, а в смысле Лейбница, но несколько обобщенном. Тем самым закон сохранения живых сил приобретает вид обобщенного закона сохранения, который может быть очень легко применен к немеханическим явлениям.

У Гельмгольца он, однако, оставался механическим законом, и в этом смысле Майер, прямо включивший немеханическую величину в число эквивалентных сил, продвинулся дальше, что и объясняет сравнительную характеристику работ Майера и Гельмгольца в «Диалектике

<sup>1</sup> Там же.

природы»<sup>1</sup>. Но строгая и четкая форма принципа сохранения, приданная ему Гельмгольцем, допускала и, более того, стимулировала выход принципа за пределы механики и в этом смысле дала решающий толчок его развитию и превращению в универсальный принцип физики. Слово «универсальный» означает здесь отнюдь не общую применимость механического принципа ко всем физическим процессам, а, напротив, немеханический характер самого принципа.

Работа Гельмгольца «О сохранении силы» представляет особый интерес сочетанием последовательного стремления свести закономерности физики к механическому принципу сохранения и внутренней логики, ведущей к немеханическому обобщению принципа. Гельмгольц исходил из иных по сравнению с Майером представлений о равенстве эквивалентных сил; он был убежден в тождестве управляющих ими законов; он думал, что переход от принципа живых сил к сохранению суммы  $L + U = \text{const}$  — это переход к иной форме закона механики. Но уже в самой механике такой переход таил в себе несколько иную трактовку ее предельных понятий. Гельмгольц говорит об энергии тяжелого тела. Из установленных Галилеем и Гюйгенсом законов маятника следует, что тяжелый шар, подвешенный на нити, поднимается (если отбросить трение и сопротивление воздуха) на ту же высоту, с которой он опустился до низшей точки. При этом скорость в низшей точке не зависит от вида пройденного пути. Если заменить маятник тяжелым шаром, катящимся по колее, которая сначала опускается, а затем поднимается, то законы маятника остаются в силе, и тяжелый шар поднимается на такое же расстояние, на которое он опустился, независимо от вида колеи. Уже отсюда можно вывести заключение, что некоторая величина не изменяется в продолжение всего движения маятника или тяжелого шара, скатывающегося и поднимающегося по некоторой колее. Эта величина равна половине произведения массы на квадрат скорости в данной точке плюс произведение веса на расстояние по высоте между данной и низшей точкой падения.

Обозначив эту величину через  $E$ , расстояние между данной и низшей точками падения через  $x$ , скорость че-

---

<sup>1</sup> См. Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955, стр. 52.

рез  $v$ , массу через  $m$ , вес тела через  $mg$ , мы получим соотношение:

$$E = \frac{m}{2} v^2 + mgx.$$

Два слагаемых, в сумме составляющих  $E$ , могут увеличиваться только одно за счет другого. Это утверждение ничем, кроме наименований, не отличается от современной формулировки закона сохранения энергии. Первое слагаемое называется кинетической энергией, второе слагаемое, пропорциональное высоте, называется потенциальной энергией. От этой величины зависит возможность последующего ускорения: когда тело вновь начинает падать, развиваемая живая сила будет равна уменьшению этой величины. Потенциальная энергия равна  $mgx$ , т. е. произведению веса на высоту подъема тяжелого тела. Сумма кинетической и потенциальной энергии  $E$  неизменна; она называется полной механической энергией тела, и неизменность этой суммы можно сформулировать как закон сохранения энергии. Если в данной системе движущихся тел отсутствуют всякие внешние воздействия и механическая энергия не превращается в другой вид энергии, то энергия системы не меняется: она всегда остается равной сумме кинетической энергии, зависящей от скоростей тел, и потенциальной энергии, зависящей от положения этих тел. Там, где между точками действуют силы тяготения и отталкивания, всякая потеря потенциальной энергии («силы напряжения») компенсируется приростом живых сил. «Во всех случаях движения свободных материальных точек под влиянием их притягательных и отталкивательных сил, интенсивность которых зависит только от расстояния, — говорит Гельмгольц, — потеря в количестве силы напряжения всегда равна приращению живой силы, а приращение первой — потере второй. Следовательно, сумма всех живых сил и сил напряжения является всегда величиной постоянной»<sup>1</sup>.

Понятие сил напряжения, т. е. потенциальной энергии, — это еще один шаг эволюции предельных понятий механики.

Предельным понятием ньютоновой механики была сила, действующая на данное тело. Она была предельным понятием потому, что вопрос о ее происхождении

<sup>1</sup> Н. Helmholtz. Über die Erhaltung der Kraft. Berlin, 1847.

выходил за рамки механики. Понятие потенциального поля еще не означало перехода к иным предельным понятиям, но приближало такой переход. Понятие потенциальной энергии, или силы напряжения, входящей наряду с кинетической энергией в общую механическую энергию тела, меняет отношение механики к физике. Механическая энергия в ряде случаев, из которых достаточно назвать неупругий удар, исчезает; в других случаях она возникает. Механическая энергия в названных случаях возникает из тепловой, электрической и т. д. либо превращается в теплоту, электричество, свет и т. д. Изменение кинетической энергии объясняется ее переходом в потенциальную и наоборот. Но чем объясняется изменение всей механической энергии изолированной системы? Только переходом немеханической энергии в механическую и обратно. Тем самым предельные понятия механики меняют свой характер. В ньютоновой механике сила была предельным понятием в абсолютном смысле. В механике Лагранжа, которая в этом отношении продолжала линию Лейбница, предельным понятием стала скалярная величина — живая сила, т. е. кинетическая энергия. Тем самым создавалась механика, допускавшая немеханическое обобщение своих понятий. Такое обобщение произошло в сороковые годы. Появление понятия полной механической энергии изменило отношение механики к физике, потому что предельное понятие механики перестало быть гранью, за которой вообще уже не было научных понятий, а стало пунктом перехода к иным, немеханическим областям. Переходы потенциальной энергии в кинетическую в явлениях, не сопровождающихся неупругим ударом или трением, вообще в собственно механических явлениях, не указывали на существование немеханических процессов. Что же касается неупругого удара, трения и т. д., то здесь в свете учения о полной механической энергии факты прямо вели к представлению о немеханических формах энергии. Понятие полной механической энергии означало, что механика, во-первых, не охватывает все закономерности мира и, во-вторых, не только отделена от других областей своими предельными понятиями, но и соединена с ними; что наряду с механической существуют другие формы энергии, связанные с механической количественно эквивалентными трансформациями. Принцип сохранения

энергии в той форме, какую он получил в сороковые годы, был концом механистической физики или, по крайней мере, началом ее конца.

Это относится не только к Майеру, но и к Гельмгольцу. Майер выдвинул идею немеханической энергии, эквивалентно переходящей в механическую, и применительно к термодинамике нашел количественные соотношения такого перехода. Гельмгольц, напротив, стремился к единой, чисто механической картине природы и хотел свести к механике все физические процессы. Но это стремление не увенчалось успехом. Гениальные исследования Гельмгольца, которому физика в такой большой степени обязана победой и утверждением принципа сохранения энергии, независимо от намерений мыслителя вели к преодолению механической ограниченности естествознания.

Сказанное относится и к докладу Гельмгольца «О сохранении силы». В части, посвященной теплоте, Гельмгольд рассматривает неупругий удар и трение и приходит к выводу, что потерянная живая сила трущихся либо соударяющихся тел переходит в энергию (силу напряжения) изменившейся молекулярной структуры тел, в звук, в электричество, а главным образом в «свободную теплоту». При отсутствии изменений молекулярной структуры, акустических и электрических явлений количество теплоты эквивалентно исчезнувшей живой силе. Гельмгольд пишет, что «количество теплоты, содержащейся в теле, может рассматриваться как сумма живой силы теплового движения (свободная теплота) и количества той силы напряжения в атомах, которая при изменении их расположения может вызвать тепловое движение»<sup>1</sup>.

Из других частей доклада «О сохранении сил» наибольшее значение имеет раздел, посвященный электричеству и магнетизму. Механика конструировалась в стройную, логически замкнутую систему понятий и соотношений еще раньше. Со времен Лангранжа идея сохранения всегда входила в эти понятия и соотношения. Теперь задача сводилась к некоторой переформулировке известных законов. В учении о теплоте первое начало термодинамики в эвристическом отношении уступало первенство

---

<sup>1</sup> H. Helmholtz. Über die Erhaltung der Kraft. Berlin, 1847.

принципу энтропии. Поэтому наиболее яркую эвристическую роль закон сохранения энергии сыграл в те времена в электродинамике<sup>1</sup>.

Доклад Гельмгольца завершил в термодинамике круг открытий сороковых годов. Пятидесятые годы начались в этой области работой Клаузиуса «О движущей силе тепла»<sup>2</sup>. В ней прежде всего опровергается идея перехода неизменного количества теплоты от котла к конденсатору тепловой машины, иными словами, идея Карно. По мнению последнего, тело, прodelывающее круговой цикл и возвращающееся в начальное состояние, т. е. к начальным значениям температуры и объема, получает в течение цикла столько же теплоты извне, сколько перешло от него к другим телам. Это количество согласно Карно не зависит от хода цикла и произведенной работы, оно определяется только достигнутым состоянием. Карно назвал его полной теплотой. С точки зрения Клаузиуса, количество тепла не может быть функцией только состояния, оно зависит от предшествующего поведения системы, от внешней работы, совершаемой системой в течение цикла, от пути перехода к данному состоянию.

От состояния системы зависит другая величина, которую Гельмголец называл количеством содержащейся в теле теплоты. Это сумма живых сил молекул и сил напряжения. Клаузиус назвал ее внутренней энергией тела<sup>3</sup>.

Во второй половине XIX в. вырастает классическая термодинамика. Клаузиус, Томсон, а затем Максвелл, Больцман и Гиббс вместе с большим числом других физиков соединяют феноменологические законы перехода теплоты в работу и работы в теплоту с кинетическими моделями теории газов. При этом приобретает все большее значение позитивная сторона принципа сохранения энергии. Сам принцип разворачивается в картину энергетических трансформаций, охватывающих Вселенную; эта картина приобретает исторический характер, она изображает космическую эволюцию, в которой создаются, развиваются и гибнут дискретные части материи — носители специ-

<sup>1</sup> См. М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 194—195.

<sup>2</sup> Pogg. Ann., 79, 368, 500, 1850.

<sup>3</sup> Clausius. Abhandl. über d. mechanische Wärmetheorie, I. Braunschweig, 1864, S. 281.

фических форм движения. Электродинамика, получившая в середине века мощный толчок от термодинамики, применив принцип сохранения энергии к проблеме электромагнитного поля, вносит свой вклад в конкретизацию и обобщение принципа сохранения. В электродинамике в восьмидесятые годы приобретает весьма конкретный вид идея локализации энергии в пространстве, высказанная Умовым в общей форме. Развитие принципа сохранения энергии объединяет физику, но совсем иным путем, чем в XVII—XVIII вв. и в начале XIX в. Тогда физика объединялась идеей универсальности механического объяснения, тождества форм движения, их сводимости к перемещению бескачественных частиц. Теперь физика объединена принципом сохранения энергии, включающим не только констатацию количественной эквивалентности, но и идею качественного разнообразия и качественных трансформаций энергии.

Пришло время для философского обобщения новой единой физической картины мира. Это было сделано Энгельсом в «Диалектике природы» и в «Анти-Дюринге». В предисловии ко второму изданию «Анти-Дюринга» (1855) Энгельс писал о диалектической революции в естествознании, вызванной необходимостью систематизировать результаты новых открытий. В этой связи говорится о новом понимании принципа сохранения энергии — положительном и качественном учении о превращении энергии при сохранении ее общей количественной меры<sup>1</sup>.

Как раз в том же году, когда Энгельс писал предисловие ко второму изданию «Анти-Дюринга», молодой немецкий физик Макс Планк начал работу, излагающую принцип сохранения энергии в его историческом развитии и систематически раскрывающую его смысл. Философский факультет Геттингенского университета в 1884 г. объявил конкурс на такую работу. Книга Планка, написанная для этого конкурса и вышедшая в 1887 г.<sup>2</sup>, отражает отмеченное Энгельсом новое понимание принципа сохранения и представляет большой, причем не только исторический, интерес.

<sup>1</sup> См. Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. М., 1953, стр. 13.

<sup>2</sup> Das Prinzip der Erhaltung der Energie, 1887 (русск. пер. М. Планк. Принцип сохранения энергии. М.—Л., 1938).

В книге, в частности, рассматривается определение энергии, в которое не входил бы заранее принцип ее сохранения. Можно определить энергию как некоторую величину, являющуюся функцией положения, скорости, температуры и других параметров, определяющих состояние системы. Но подобное определение энергии предполагает ее сохранение. Возможно и другое определение, не связанное с таким предположением. Его выдвинул в вполне отчетливой форме Вильям Томсон в докладе, прочитанном в Единбурге в 1851 г.<sup>1</sup> Под энергией понимается выраженная в единицах механической работы сумма действий, происходящих вне системы, когда система переходит из одного состояния в другое, принимаемое за нулевое. Понятие «действие», происходящее вне системы», имеет непосредственный смысл, если принять во внимание все изменения положений, скоростей, температур и прочих свойств тел природы, не входящих в рассматриваемую систему, включая расстояния между внешними телами и телами, входящими в систему. Например, изменение положения системы относительно Земли под влиянием тяжести есть с этой точки зрения внешнее действие изменения состояния системы<sup>2</sup>. Если внешние действия имеют механическую природу или если известен их механический эквивалент, прямой смысл приобретает также понятие «измеренная в единицах механической работы». В ином случае требуется определить этот эквивалент, вычислив количество механической работы, которое может произвести внешнее действие, либо из которого оно может быть получено.

Такое определение энергии еще ничего не говорит о ее сохранении. Сохранение энергии — это однозначность ее при определении состояния системы по отношению к другому, «нулевому» состоянию. Если определить энергию, как это только что сделано, то сохранение энергии означает один и тот же суммарный механический эквивалент действий, произведенный вне системы, при ее переходе из рассматриваемого состояния в нулевое, независимо от пути такого перехода. Подобная независимость не предполагается определением, а доказывается экспериментом.

---

<sup>1</sup> Phil. Mag. (4), 3, 529, 1852.

<sup>2</sup> См. М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 96.

Следовательно, принцип сохранения энергии это не априорное требование, высказанное в определении, а эмпирически полученное соотношение.

Из высказанного таким образом принципа сохранения энергии можно легко получить невозможность вечного двигателя<sup>1</sup>. Нулевое состояние определяется произвольным образом; его можно принять равным данному состоянию. Тогда из независимости энергии (в этом случае равной нулю) от пути перехода следует, что, каким бы путем система ни переходила из данного состояния в то же самое состояние (т. е. при любом циклическом процессе), механический эквивалент внешних воздействий такого перехода остается равным нулю.

Можно обобщить подобную форму принципа сохранения энергии и само ее определение. Планк в «Принципе сохранения энергии» делает это следующим образом<sup>2</sup>. Энергия — это сумма внешних механических воздействий, производимых процессом перехода системы из состояния  $A$  в нулевое состояние  $N$ . Этому процессу  $A \rightarrow N$  соответствует энергия  $[AN]$ . Возьмем другое состояние  $B$  и определим энергию системы в этом состоянии, пользуясь тем же нулевым состоянием  $N$ . Вычисленная таким образом энергия  $[BN]$  позволяет определить работу  $[AB]$  внешних воздействий при переходе  $A \rightarrow B$ :

$$[AB] = [AN] - [BN].$$

Если такой переход не дает внешних воздействий, то  $[AB] = 0$ ; следовательно,  $[AN] = [BN]$ ; иными словами, энергия системы не меняется, если переход системы из одного состояния в другое не дает внешних воздействий, а сводится к внутренним действиям. Это — принцип сохранения энергии, высказанный без ссылок на внешние воздействия; энергия, сохраняющаяся в системе, локализована в ней. Таким путем Планк приходит к определению энергии и понятию ее сохранения без ссылок на внешние воздействия. Энергия системы при некотором произвольно выбранном нулевом состоянии целиком определяется данным мгновенным состоянием. Сохранение энергии в системах, не оказывающих внешних воздейст-

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 102.

<sup>2</sup> Там же, стр. 104—141.

вий, нетривиально: энергия сохраняется при внутренних действиях, сохраняющих ее величину, но изменяющих ее форму. Тем самым сохраняющаяся величина представляется суммой различных форм энергии.

Такое понятие энергии Планк называет субстанциальным. Разумеется, этот термин ничего общего не имеет с попытками поставить энергию на место материи в качестве субстанции. Планк просто пользуется аналогией: при сохранении массы может меняться соотношение химических веществ в данном теле, подобным же образом при сохранении количества энергии может меняться соотношение между ее формами.

Такой взгляд на энергию отличается от высказанного прежде (определение через внешние механические воздействия) некоторой неопределенностью. Величина работы внешних воздействий — это определение не зависит от тех или иных гипотез, относящихся к локализации энергии внутри системы. Новое определение зависит от них: чтобы трактовать энергию как сумму различных форм энергии, нужно сделать определенные, конкретные физические допущения, и это вносит известную неоднозначность в понятие энергии. Например, электростатическая энергия системы заряженных проводников в состоянии равновесия, определенная однозначным образом при первоначальной трактовке, теперь требует для своего определения решения вопроса: распределена ли эта энергия в диэлектрике или ее следует искать в самих проводниках, в зарядах, действующих друг на друга на расстоянии и распределенных по поверхности проводников.

Но подобная неопределенность и сообщает понятию энергии его эвристическую ценность. Она, эта неопределенность, становится физической задачей. «При такой трактовке,— пишет Планк,— уже не станут удовлетворяться знанием численного значения энергии, но попытаются доказать существование различных видов энергии в различных элементах системы в отдельности и проследить их переход в другие формы и к другим элементам точно так же, как это делается по отношению к движению некоторого количества вещества в пространстве»<sup>1</sup>.

Переход от «внешнего» определения энергии к «внут-

---

<sup>1</sup> Принцип сохранения энергии, стр. 107.

ренному», иначе говоря, к исследованию существования, локализации и взаимных переходов различных форм энергии в системе, в конце концов позволил представить энергию в виде множества более или менее локализованных элементов, связанных с локализованными элементами вещества. Это и был основной путь развития принципа сохранения энергии в шестидесятые — восьмидесятые годы. Излагаемые здесь взгляды Планка были обобщающим итогом этой широкой тенденции и предвосхищением еще более решительных шагов, приведших к микроскопической картине локализации и превращений энергии.

Систематически развивая «субстанциальное», т. е. «внутреннее» представление об энергии, Планк уточняет понятие внутренних действий в системе. Определение этих действий зависит от границ системы: раздвигая границы, включая в систему тела, подвергающиеся внешним воздействиям, мы можем представить последние в качестве внутренних. Этот процесс, строго говоря, не может закончиться: всегда остаются внешние тела, оказывающие воздействие на систему и испытывающие воздействие с ее стороны. Тем не менее всегда можно выделить систему, внешние воздействия которой так малы, что их можно не учитывать. Здесь мы сталкиваемся с соотношением, которое Эддингтон много позже назвал принципом с х о д и м о с т и <sup>1</sup>. Сохранение энергии в данной системе будет строгим, если отсутствие внешних воздействий имеет абсолютный характер. Поэтому строгим образом сохранение энергии в системе имеет место, если система охватывает всю бесконечную Вселенную. Но приближенно оно осуществляется во всякой приближенно изолированной системе. При этом по мере бесконечного приближения к идеальной изоляции бесконечно растет точность утверждения о сохранении энергии в системе. Расширяя рассматриваемую систему, мы получаем сходящийся ряд.

Принцип сохранения энергии, рассматриваемой с указанной «внутренней» стороны, приравнивает нулю разность между энергиями любых двух состояний. Чтобы положить это утверждение в основу расчетов, нужно знать общее выражение энергии системы. Энергия ее

---

<sup>1</sup> А. Эддингтон. Пространство, время и тяготение. Одесса, 1923, стр. 154.

определяется мгновенным состоянием. Состояние нужно понимать как совокупность положений и скоростей материальных точек, входящих в систему. Если величины, выражающие положения и скорости, заданы, то все переменные системы можно определить как функции времени. Такое определение состояния достаточно для механических процессов; для других процессов оно обобщается: состояние материальной системы в определенный момент времени — это совокупность величин (кроме координат и их первых производных по времени, также температура, сила тока и т. д.), определяющих течение происходящего в системе процесса. Ускорения, скорости, изменения температуры и т. д. не входят в понятие состояния, так как они зависят от указанных только что величин (даже в случае, когда сила зависит от ускорения).

В общем случае величины, определяющие состояние, независимы друг от друга, но они могут быть и связаны, причем не только в механике, где число обобщенных координат ограничено уравнениями связей. Например, закон Ома в случае постоянного тока ограничивает независимость напряжения, сопротивления и тока. Подобная зависимость и делает неопределенным «внутреннее» понятие энергии. Энергия как функция переменных, определяющих состояние системы, может быть выражена единственным образом, если все эти переменные независимы. Такую функцию Планк называет первичным выражением энергии. Если же для некоторых состояний существует зависимость одних переменных от других (например, закон Ома для постоянного тока), то мы не можем в общем случае найти однозначное, первичное выражение для энергии.

Планк приводит пример, сразу переносающий нас в атмосферу идейных споров восьмидесятых годов. Выше уже говорилось о неопределенности понятия электростатической энергии системы заряженных проводников в состоянии равновесия. Какая форма энергии соответствует «первичному выражению»: энергия, распределенная в пространстве диэлектрика, или энергия на поверхности проводников? Сейчас этот вопрос уже решен. Но Планк приводит другой пример, сохранивший не только исторический интерес. В случае двух тяготеющих друг к другу масс первичным выражением их энергии считают произ-

ведение масс, деленное на расстояние между ними. Но это выражение является однозначным лишь с точки зрения дальнего действия. Если представить себе, что тяготение распространяется в конечное время через среду посредством ее деформации, обычное выражение для энергии перестает быть, вообще говоря, однозначным. Оно остается справедливым для стационарного состояния деформированной промежуточной среды. Наиболее общее выражение энергии должно представиться в виде интеграла по всему объему промежуточной среды.

Из приведенных принципов видно, что в поисках однозначного «первичного выражения» для энергии физика в результате новых гипотез о природе происходящих в системах процессов и экспериментальной проверки этих гипотез приходит к представлению о различных видах энергии в системе. В общую, полную энергию входят эти различные виды, в системе происходят разнообразные механические, тепловые, электрические, магнитные и химические явления. В чем же состоят изменения состояния системы, иначе говоря, — происходящие в ней физические процессы? Сумма отдельных видов энергии не меняется; значит, меняются лишь за счет других количества энергии определенного вида, ...«следовательно, всякий процесс, происходящий в природе, можно рассматривать как превращение отдельных видов энергии друг в друга...»<sup>1</sup>.

Таким образом, «внутреннее» определение энергии и ее сохранения приводит к положительному и качественному пониманию принципа сохранения.

Дальнейшее изложение и анализ взглядов Планка позволяют увидеть отношение такого понимания к механическому мировоззрению.

Планк развивает мысль о позитивном смысле принципа сохранения. Этот принцип не только охраняет неизменность суммарной энергии системы. Он констатирует не только указанную неизменность (отрицательная и количественная сторона дела), но и закономерности изменений (положительная и качественная сторона). Для этого недостаточно одного уравнения постоянства

---

<sup>1</sup> М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 119

энергии. Необходимо множество уравнений, однозначно определяющих будущее системы. Прибегнем опять к аналогии с сохранением массы. При неизменности масс, их положение в пространстве меняется, и в некотором ограниченном объеме пространства масса, вообще говоря, непостоянна. Однако прирост массы в данном объеме всегда равен массе, прошедшей извне сквозь поверхность, ограничивающую объем. Вернемся к энергии. Выделим в системе некоторую подсистему и вычислим ее энергию. Эта энергия в общем случае непостоянна, но изменение ее всегда соответствует изменению состояния, связанному с работой внешних воздействий — притоку энергии извне. Здесь аналогия с движением масс становится условной вследствие возможной неаддитивности энергии: полная энергия может отличаться от суммы частей за счет действия на расстоянии; энергия аддитивна, если в системе существуют лишь близкодействующие силы.

Указанным путем можно разложить одно уравнение постоянства энергии системы на множество уравнений, характеризующих изменение энергии в частях системы, количественно эквивалентное внешним воздействиям. Также множество уравнений описывает поведение системы, течение происходящих в ней процессов во времени.

Если применение принципа сохранения энергии как функции состояния системы приводит к необходимости однозначных физических допущений о локализации и формах энергии в системах, то в целом применение принципа означает построение некоторой картины мира. Подобной картиной мира — именно механической картиной — закон сохранения стал в работе Гельмгольца 1848 г. В каждой системе энергия фигурирует в двух формах, — зависящей от скоростей (кинетическая энергия) и зависящей от координат (потенциальная энергия). Такое разделение энергии на различные формы и такая зависимость от состояния (выбор переменных состояния) выводится из представления о мире как множестве материальных точек, связанных между собой центральными силами.

Позиция Планка — иная, характерная для конца XIX в., для времени, когда незыблемость механического объяснения природы была подорвана итогами всего развития классической физики и в особенности итогами развития термодинамики (необратимость) и электродинами-

ки (реальность поля). Планк в восьмидесятые годы еще признавал механическое объяснение идеальным типом физического объяснения явлений. Но он уже видел принципиальную возможность неудачи универсального механического объяснения и поэтому считал необходимым отказаться от выведения закона сохранения из универсальной картины центральных сил. Планк склонялся к мысли считать принцип сохранения исходным принципом физики, независимым от механической картины мира и опирающимся на опытный закон невозможности вечного двигателя. Мы увидим в следующей главе аналогичный подход Планка ко второму началу термодинамики.

Изложенные взгляды Планка были итогом развития термодинамики и отчасти электродинамики вплоть до восьмидесятых годов и отражали тенденции, характерные и для следующего периода. Наука последовательно делала все более четким и количественно определенным понятие движения, рассматриваемого с новой по сравнению с механикой точки зрения. Если рассматривать тело так, как его рассматривает механика, ему можно приписать наряду с массой пространственные предикаты (координаты и их производные — скорость и ускорение), а также определенный импульс и энергию, зависящую от положения тела (потенциальную) и от изменения положения (кинетическую). Теперь тело рассматривается с иной точки зрения. Термодинамика рисует макроскопически неподвижное тело. Иными словами, если тело рассматривается как система материальных точек, то движение системы как целого игнорируется. Поэтому игнорируются и изменение потенциальной энергии, и кинетическая энергия при движении системы как целого. Остальная энергия — внутренняя — зависит от состояния системы. Чтобы определить зависимость энергии от состояния, пользуются понятием адиабатического процесса, при котором исключен теплообмен между системой и другими телами и состояние системы может изменяться только при изменении механических параметров. Величина работы, совершенной при адиабатическом процессе, равна разности внутренних энергий в начале и конце рассматриваемого процесса. Но изменение внутренней энергии, эквивалентное указанному результату механической

работы, может быть достигнуто при нарушении адиабатической изоляции за счет теплообмена. Эта эквивалентность и означает эквивалентность тепла и работы, лежащую в основе первого начала термодинамики — специфической формы принципа сохранения энергии для процессов, в которых существенную роль играет теплота.

Вернемся теперь к соотношению между сохранением энергии и сохранением импульса. Естественным обобщением двух мер движения могла быть величина, объединяющая импульс и энергию в качестве своих компонент. Такое обобщение было произведено в начале XX столетия в теории относительности. К этому обобщению можно подойти, напомнив о связи между сохранением импульса и сохранением лейбницевой меры движения, которая была указана еще во времена Лейбница его современником Христианом Гюйгенсом.

Смысл концепции Гюйгенса состоит в следующем. Если при ударах тел, входящих в систему, сохраняется для всей системы лейбницева мера движения, то можно отсюда вывести сохранение картезианской меры движения, рассматривая эту систему в движении, т. е. глазами человека, относительно которого движется вся эта система сталкивающихся тел. Можно дать доказательство этого соотношения в современной форме<sup>1</sup>.

В системе, состоящей из соударяющихся частиц с массами  $m_i$ , скорости частиц  $\mathbf{u}_i$  переходят после ударов в скорости  $\mathbf{U}_i$ . Сохранение энергии выражается уравнением

$$\frac{1}{2} \sum_i m_i \mathbf{u}_i^2 = \frac{1}{2} \sum_i m_i \mathbf{U}_i^2.$$

Пусть система приобретает добавочную скорость  $\mathbf{v}$ . Скорости частиц до удара будут теперь равны  $\mathbf{u}_i + \mathbf{v}$ , а после удара  $\mathbf{U}_i + \mathbf{v}$ , и сохранение энергии выражается теперь соотношением:

$$\frac{1}{2} \sum_i m_i (\mathbf{u}_i + \mathbf{v})^2 = \frac{1}{2} \sum_i m_i (\mathbf{U}_i + \mathbf{v})^2,$$

<sup>1</sup> В. Паули. Законы сохранения в теории относительности и в атомной физике. Доклад в университете им. Н. Д. Зелинского. См. «Современные проблемы физико-химии и химической технологии». Сб. II, М., 1938, стр. 22.

или:

$$\frac{1}{2} \sum_i m_i (\mathbf{u}_i^2 + 2\mathbf{v}\mathbf{u}_i + \mathbf{v}^2) = \frac{1}{2} \sum_i m_i (\mathbf{U}_i^2 + 2\mathbf{v}\mathbf{U}_i + \mathbf{v}^2).$$

Следовательно:

$$\sum_i m_i \mathbf{v}\mathbf{u}_i = \sum_i m_i \mathbf{v}\mathbf{U}_i$$

и

$$\mathbf{v} \sum_i m_i \mathbf{u}_i = \mathbf{v} \sum_i m_i \mathbf{U}_i.$$

Скорость  $\mathbf{v}$  — произвольна, поэтому написанное равенство будет справедливым только в том случае, когда:

$$\sum_i m_i \mathbf{u}_i = \sum_i m_i \mathbf{U}_i.$$

Иначе говоря, импульс системы до соударения частиц, равный выражению, стоящему слева, сохраняется после соударения. Именно таков по существу вывод Гюйгенса.

Релятивистское объединение законов сохранения импульса с законом сохранения энергии отличается от идеи Гюйгенса только одним (и это «одно» включает модификацию понятия энергии в результате двухвекового развития физики): объединение двух законов не зависит от определенного вида функции, связывающей энергию со скоростью. Оно выводится из общих соображений о пространстве и времени. Соответственно представим энергию, как некоторую произвольную функцию скорости, помноженную на массу:

$$E = mf(\mathbf{u}).$$

Энергия — скалярная величина. Поэтому в силу изотропности пространства энергия не может зависеть от направления вектора скорости  $\mathbf{U}$ , т. е. от его компонент. Она может зависеть только от скалярного значения скорости; поэтому

$$E = mf(u).$$

Импульс тела — величина, ориентированная в пространстве, — совпадает по направлению со скоростью  $\mathbf{u}$ , а его

абсолютное значение представляет собой некоторую функцию  $g(u)$  абсолютного значения скорости

$$\mathbf{p} = m\mathbf{u}g(u).$$

Высказав эти предположения об энергии и импульсе как произвольных функциях  $f(u)$  и  $g(u)$  скорости, можно представить законы сохранения следующим образом:

$$\sum_i m_i f(u_i) = \sum_i m_i f(U_i),$$

$$\sum_i m_i \mathbf{u}_i g(u_i) = \sum_i m_i \mathbf{U}_i g(U_i).$$

Теперь можно определить виды функций  $f(u)$  и  $g(u)$ , при которых законы сохранения остаются справедливыми в любой равномерно движущейся системе отсчета. Оказывается, такому требованию удовлетворяют только один вид функции  $f(u)$  и только один вид функции  $g(u)$ ; первая из этих функций представляет собой квадрат, а вторая — первую степень абсолютного значения скорости  $U$ . Следовательно, требование ковариантности законов сохранения энергии и импульса приводит к обычным выражениям для этих величин:

$$E = mu^2;$$

$$\mathbf{p} = m\mathbf{u}.$$

Таким образом, можно прийти к выражениям для энергии и для импульса, исходя из требования, чтобы законы сохранения энергии и импульса были справедливыми для всех инерциальных систем. Эти выражения сохраняются и в теории относительности с единственным изменением: вместо классической суммы  $u + v$  скоростей  $u$  и  $v$  нужно взять релятивистскую сумму

$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}},$$

где  $c$  — скорость света.

Однако законы сохранения энергии и импульса в теории относительности претерпевают существенное изменение: они сливаются в единый закон. Три слагающие импульса и скалярное значение энергии связываются в один

четырёхмерный вектор энергии-импульса и соответственно теория относительности приходит к единому закону сохранения. Это естественный результат объединения времени и пространства в одном четырёхмерном представлении.

Под влиянием теории относительности понятия энергии и импульса подверглись весьма тонкому и плодотворному анализу в работах Неттер<sup>1</sup> и Гильберта. Была выяснена связь сохранения энергии с однородностью времени и сохранения импульса с однородностью пространства.

Эта связь позволяет сформулировать некоторую общую оценку основных исторических этапов развития всей физики в новое время, начиная от Галилея и до наших дней.

В чем состоит позитивная идея, которая проходит, развиваясь и конкретизируясь, через всю историю естествознания с его возникновения вплоть до наших дней, идея, позволившая естествознанию построить всю современную физическую картину мира, идея, модифицированная, но в целом подтверждается всем развитием науки?

Такой идеей не могло быть сведение явлений природы к механическим перемещениям. Уже в XIX в. узнали о несводимости сложных форм движения к перемещению. Далее, в XX в., пришлось по-иному рассматривать самое механическое перемещение: оно оказалось весьма сложным результатом, может быть статистической аппроксимацией немеханических процессов.

Стержневой идеей всей новой физики, идеей, освободившей естествознание от теологического авторитета, разбившей антропоцентризм и креационизм, идеей, развитой и подтвержденной всем прогрессом науки, можно считать мысль об однородности и изотропности пространства и времени.

Развитие физики в XVIII—XX вв. бесспорно подтверждает такую оценку. Более того, можно представить всю историю физики от Галилея до теории относительности включительно как последовательное обобщение идей однородности и изотропности: сначала идея однородности и изотропности была применена к пространству и привела к представлению о космической инерции (Галилей)

---

<sup>1</sup> E. Noether. Götting. Nachr., 235, 1918.

прямолинейной инерции и сохранении импульса (Декарт) и принципу относительности инерционного движения (Ньютон). Затем появилась (впрочем, неявно) идея однородности времени, лежащая в основе закона сохранения энергии — стержне всей физики XIX столетия. Наконец в специальной теории относительности появилась идея изотропности и однородности пространственно-временного мира и в общей теории относительности — искривленного мира.

Если однородность и изотропность пространства были идеей, последовательно обобщенной и доказанной в развитии современной науки, то, очевидно, началом современной науки была первая подлинно научная форма указанной идеи — принцип космической инерции Галилея. Этот принцип высказан в «Диалоге о двух системах» в качестве основного аргумента в защиту гелиоцентризма: относительность инерционного движения разбивает антикоперниканские ссылки на отсутствие прямых физических признаков движения Земли. В посленьютоновой картине мира движение, которое Земля сообщает находящимся на ней предметам при своем суточном вращении, направлено по касательной к земной поверхности. Для Галилея направление инерционного движения совпадает с направлением движения находящихся на Земле предметов. Представление об инерционном движении как о круговом дальше от современной науки, чем ньютонова механика, объединившая законы криволинейного движения Кеплера с динамикой Галилея. Но современная наука в известном смысле вернулась к единой теории движения без ньютоновского расчленения на инерцию и искривляющее поле и в лице Эйнштейна рассматривает движение в поле тяжести как движение по инерции в искривленном мире. Разумеется, у Галилея в представлении о криволинейном инерционном движении (как и в изложенном в «Беседах и математических доказательствах» представлении об исчезновении тяжести в системе, движущейся с ускорением, равным ускорению свободно падающих тел) не было и не могло быть предвосхищения общей теории относительности. Просто в работах Галилея, т. е. у истоков классической механики, ее принципы не получили строгой и застывшей формы, какую они приобрели в ньютоновых «Началах». Чтобы вернуться к единому

представлению об инерционном движении, включающем движение под действием силы тяжести, наука должна была пройти трехсотлетний путь развития классической механики прямолинейных инерционных движений и сил и, что самое главное, накопить сведения и понятия, вообще выходящие за рамки механики.

Нет нужды доказывать, что классическая механика XVII—XVIII вв. основана на идее однородного, изотропного пространства. Следует перейти к тому обобщению идеи однородности, которая лежала в основе классической физики XIX столетия. Энгельс в «Диалектике природы» охарактеризовал естествознание этого столетия как учение о формах движения, переходящих друг в друга и несводимых друг к другу. Принцип сохранения энергии является с этой точки зрения стержневым принципом физики XIX в. В упомянутой выше работе Неттер показала, что свойства пространства, времени и инвариантного пространственно-временного интервала связаны с законами сохранения. Каждой непрерывной группе преобразований координат соответствует особый закон сохранения. Сохранение импульса связано с инвариантностью относительно пространственных смещений, т. е. с однородностью пространства. Сохранение энергии связано с инвариантностью относительно сдвига во времени, т. е. с однородностью времени. Сохранение момента количества движения выражает изотропность пространства.

Картезианская физика знала о сохранении скорости и количества движения. Все это не выходит за рамки физики однородного пространства, но уже лейбницова мера движения вышла за эти рамки. Энгельс рассматривал переход от картезианской к лейбницовой мере движения как переход к иному ряду явлений. Сейчас мы знаем, что это — переход к явлениям, для которых существенна однородность времени.

Таким образом, крупнейший этап в развитии современной физики — переход к новой многокрасочной картине различных форм движения, переход от XVII—XVIII к XIX в. — означал обобщение понятия однородности. В XVII—XVIII вв. это понятие применялось в физике по отношению к пространству. Теперь в физику вместе с законом сохранения энергии вошла идея однородности времени.

Идея однородности пространства и времени развивалась в тесной связи с идеей причинности. Закон инерции был отрицательной формулой принципа причинности, закон сил — положительной формой. Принцип сохранения импульса означал, что изменение координат не может привести к изменению состояния тела: для этого нужны физические причины, фигурирующие в механике Ньютона под именем сил. Принцип сохранения энергии означает, что абстрактное течение времени не может вызвать изменения физических состояний; здесь необходимы эквивалентные затраты энергии.

Специальная теория относительности — это обобщение однородности на четырехмерный пространственно-временной мир, некоторый синтез классических идей однородности пространства (сохранение импульса) и однородности времени (сохранение энергии). Общая теория относительности — обобщение идеи однородности на искривленный мир.

---

## V. ПРИНЦИП НЕОБРАТИМОСТИ

Необратимое и невозвратное, направленное в одну сторону течение времени принадлежит к числу наиболее очевидных представлений. Из него вытекает то впечатление абсолютного неправдоподобия, которое мы получаем, наблюдая кадры кинофильма, движущиеся в обратном направлении, или читая уэллсову «Машину времени»<sup>1</sup>. Ощущение необратимости времени основано на наблюдении живой природы и физических процессов<sup>2</sup>. Напротив, механические явления не дают такого ощущения. Если мы будем смотреть фильм в обратном порядке и увидим, что локомотив пошел назад, то это не покажется нам неправдоподобным. Локомотив попросту дал задний ход, и здесь нет ничего необычного. Но, если дым паровоза будет образовываться в пространстве и входить в паровозную трубу,— это покажется совершенно невозможным. Обращенное время выглядит абсурдным во всех тех случаях, когда видны физические процессы, сопровождающие движение паровоза. Обобщая подобные примеры, можно сказать, что даже повседневные наблюдения приводят резкую черту между механическим перемещением и более сложными формами движения. Молекулярному движению несвойственна обратимость механических процессов. Поэтому принцип необратимости, который был достоянием человеческого опыта в течение тысячелетий, вошел в физику только с того момента, когда молекулярные процессы стали основным полем экспериментального и теоретического исследования. Последнее, как мы видели,

<sup>1</sup> См. Э. Мейерсон. Тожественность и действительность. Пб., 1912, стр. 227—228.

<sup>2</sup> Там же, стр. 228—229.

произошло после того, как производственная техника овладела молекулярным движением.

Закон всемирного тяготения Ньютона, теория Дарвина и даже принцип относительности Эйнштейна были завершением длительных тенденций в науке. В отличие от них выдвинутый Карно принцип необратимого перехода тепла от более нагретого тела к менее нагретому не имеет таких истоков. Может быть, поэтому в «Размышлениях о движущей силе огня» так ясно видны производственно-технические корни теории.

На рубеже XVIII и XIX и в начале XIX в. конструкторов паровых машин в наибольшей степени интересовали два вопроса общей теории тепловых двигателей. Существует ли предел последовательного улучшения двигателей? Существуют ли принципиальные преимущества у различных, используемых в двигателях рабочих тел? Эти проблемы и хотел решить Карно в «Размышлениях». Для историка существенно, что указанные проблемы могли заинтересовать конструкторов только в самом конце XVIII и главным образом уже в XIX в. Непосредственно после появления паровых машин в Англии и на континенте их экономичность не была предметом сравнительных оценок и непосредственной целью конструктивных улучшений. Паровые машины освобождали производство от необходимости строить фабрики возле рек, и это оправдывало применение машин. Но с течением времени расход топлива стал критерием если не применения паровой машины — ее не с чем было в этом смысле сравнивать, — то выбора той или иной конструкции, той или иной схемы из большого числа схем, о которых знали конструкторы. Теперь уже сама деятельность конструкторов приводила к обобщенным проблемам. Многочисленные конструкции нужно было сопоставлять с некоторым идеальным двигателем, экономичность которого рассматривалась как максимальная. От чего же зависит экономичность такого идеального двигателя? Ограничена ли она? Остается ли она неизменной при переходе от водяного пара к другим рабочим телам?

Эти вопросы и поставил перед собой Сади Карно. Он пишет:

«Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо его изучить независимо

от какого-либо механизма, какого-либо определенного агента, надо провести рассуждения, приложенные не только к паровым машинам, но и ко всем мыслимым тепловым машинам, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него не производилось воздействие»<sup>1</sup>.

Вслед за этим Карно говорит о принципиальном различии между механическими и тепловыми двигателями. Первые (мы сказали бы сейчас: машины, в которых движение трансформируется в пределах одной формы) допускают механическое объяснение вплоть до мельчайших элементарных процессов. Вторые пока не обобщены подобной полной теорией.

«Машины, не получающие движения от тепла, а имеющие двигателем силу человека или животных, падение воды, поток воздуха и т. д., могут быть изучены до самых мелких деталей посредством теоретической механики. Все случаи предвидены, все возможные движения подведены под общие принципы, прочно установленные и приложимые при всех обстоятельствах. Это характерное свойство полной теории. Подобная теория, очевидно, отсутствует для тепловых машин. Ее нельзя получить, пока законы физики не будут достаточно расширены и достаточно обобщены, чтобы наперед можно было предвидеть результаты определенного воздействия теплоты на любое тело»<sup>2</sup>.

Эти строки можно перечитывать бесконечное число раз, находя в них все новый смысл, в том числе смысл, который был им придан последующим развитием науки. Приведенные строки бессмертного трактата Карно можно сопоставить по их историческому значению с вводными фразами галилеева «Диалога», посвященными венецианскому арсеналу. Механизмы арсенала произвели на Галилея сильное и плодотворное впечатление именно той стороной механических устройств, о которых два с лишним века спустя писал Карно: они могут получить исчерпывающее рациональное объяснение в теории, оперирующей соотношениями механики. Галилей распространил эти соотношения на мир небесных тел и создал общую и уни-

<sup>1</sup> Сади Карно. Размышления о движущей силе огня. Второе начало термодинамики, стр. 19.

<sup>2</sup> Там же.

версальную теорию движения всех тел природы от мельчайших частиц до Солнца и планет. Эта теория приобрела у Декарта характер единого кинетического мировоззрения, не допускающего в природу ничего, кроме частиц вещества, движущихся по строгим законам механики, а у Ньютона она стала системой однозначных всемогущих законов, которым подчиняется — это было показано всей экспериментальной наукой и всей практикой — природа.

Теперь, когда законы теоретической механики возвращаются в мастерские, откуда их когда-то извлек обобщающий гений науки XVII в., они застают здесь новые машины, и в работе этих машин законы механики не могут объяснить любые детали. Является ли это затруднение принципиальным? Можно думать, что Карно как-то ощущал принципиальный характер несводимости процессов, происходящих в паровых машинах, к соотношениям теоретической механики. Он говорит в цитированном отрывке, что полная теория, наперед однозначно определяющая поведение тел при заданном воздействии теплоты, может быть создана, когда законы физики будут «достаточно расширены и достаточно обобщены». Трудно избежать искушения модернизировать эту фразу; сама по себе она дает для этого повод. Карно пишет о расширении и обобщении физики по сравнению с объясняющей работу старых двигателей теоретической механикой. Но не поддадимся соблазну модернизации: гениальность Карно не в прямом предвосхищении физических законов, несводимых к механике,— такая несводимость приобрела рациональный смысл в статистической физике, о которой Карно не знал,— а в конкретных физических констатациях и понятиях, получивших много позже объяснение с помощью представлений о статистических закономерностях, несводимых к динамическим закономерностям механики.

Теперь мы можем «предвидеть результаты определенного воздействия теплоты на любое тело»; но воздействие и его результаты определимы лишь с вероятностью, практически совпадающей с достоверностью для макроскопических тел. С механизмами, подчиненными классическим динамическим соотношениям, совпадают по своей природе микроскопические группы частиц (так, по крайней мере, допускала классическая термодинамика); но

статистические ансамбли обладают иными свойствами и подчиняются иным соотношениям, прежде всего принципу необратимости.

До Больцмана этот принцип не был связан подобным образом с механикой. До Клаузиуса и Томсона он вообще не был связан с картиной движущихся частиц. Как же могла быть установлена связь между необратимостью и механикой в пределах макроскопической теории? Только фиктивным образом, с помощью гипотетического теплорода, с помощью представления об уравнивании неуничтожаемого флюида.

Заключительные страницы трактата Карно показывают с большой отчетливостью производственно-технические корни генезиса термодинамики вообще и второго начала в особенности. Здесь прослеживаются конкретные усовершенствования паровой машины, приводятся данные из патентов, статей, обзорных работ, Британской энциклопедии и т. д. Улучшения машины обеспечивали большую надежность, прочность, долговечность и прежде всего экономичность, достигавшуюся, в частности, применением высокого давления. Карно сделал первый шаг к обобщенной теории, рассматривая наряду с паровой машиной тепловую машину — идеальную схему, свойства которой не зависят от примененного рабочего тела. Далее он делает второй шаг, обобщая все попытки применения высокого давления. Карно доказывает, что высокое давление позволяет использовать больший температурный перепад.

По мнению Карно, в паровой машине, теплород, полученный в топке, проходит через стенки котла, превращает воду в пар и соединяется с паром. Пар увлекает с собой теплород, в цилиндре теплород выполняет механическую работу и затем поступает в конденсатор, где холодная вода поглощает его. Таким образом, в основе работы тепловой машины лежит восстановление равновесия теплорода, переход теплорода от нагретого тела — воздуха в топке к холодному — воде в конденсаторе. Отходящие газы котла при выходе из труб холоднее, чем в момент сгорания. В свою очередь холодная вода, пройдя через конденсатор, нагревается.

«Возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода, а его

переходу от горячего тела к холодному, т. е. восстановлению его равновесия,— равновесия, которое было нарушено некоторой причиной, будь то химическое действие, как горение, или что-нибудь иное»<sup>1</sup>.

Таким образом, принцип энтропии еще очень далек от своей позднейшей кинетической интерпретации. Теплота представляется неуничтожаемой субстанцией. В «Размышлениях о движущей силе огня» Карно разделяет (с упомянутыми выше оговорками) эту концепцию; поэтому принцип энтропии выражен здесь как принцип необратимого уравнивания теплорода.

«Согласно этому принципу,— продолжает Карно,— недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод, без него теплота стала бы бесполезна. В самом деле, если бы вокруг нас были тела только такие же горячие, как и топка, каким бы образом можно было сконденсировать пар? Куда бы его деть, раз он получен? Не следует думать, что его можно, как это практикуется в некоторых машинах, выбросить в атмосферу: атмосфера не приняла бы его. Она принимает его в обычных условиях, потому что выполняет роль большого холодильника, потому что она находится при более низкой температуре: иначе она была бы им вскоре заполнена или, вернее, была бы насыщена им еще раньше»<sup>2</sup>.

Далее Карно анализирует ту же проблему в положительном аспекте.

«Повсюду, где существует разность температур, повсюду, где возможно восстановление равновесия теплорода, возможно получение движущей силы. Водяной пар есть одно из средств обнаруживать эту силу, но не единственное: все тела природы могут быть применены для этого, все тела способны к изменению объема — к сжатию и расширению — под действием тепла и холода, все способны при изменении своего объема побеждать некоторые сопротивления, и, таким образом, развивать движущую силу»<sup>3</sup>.

Примером служит железный стержень, который увеличивает свой размер при нагревании и сокращается при

---

<sup>1</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 20.

<sup>2</sup> Там же, стр. 20.

<sup>3</sup> Там же, стр. 21.

охлаждении. Газообразные тела в большей степени изменяют свой объем в зависимости от температуры, и именно поэтому они практически применяются для тепловых машин, которые принципиально не отличаются от любого другого способа превращения тепла в механическую работу. Пар может действовать в тепловой машине и не конденсируясь, оставаясь в одном и том же агрегатном состоянии за счет изменения объема и давления в зависимости от температуры. Можно пользоваться не только паром воды, но и парами всех тел, способных переходить в газообразное состояние. Во всех этих машинах движущая сила возникает благодаря восстановлению равновесия теплорода. Теплота оказывается причиной механической работы в том случае, когда она увеличивает объем или форму тела. Эти изменения происходят благодаря переменам температуры; но, чтобы изменить температуру, увеличить ее и затем уменьшить, нужно иметь два тела: одно более горячее, другое более холодное. Тогда, отнимая теплород от первого и передавая его второму, мы заставляем промежуточные тела изменять свои объемы и производить механическую работу.

По мнению Карно, «повсюду, где имеется разность температуры, может происходить возникновение движущей силы». Справедлива и обратная теорема: затрачивая механическую энергию, можно создать разность температуры, нарушить равновесие теплорода. Примером служат удары и трение тел, которые сообщают им температуру более высокую, чем в окружающей среде, и таким образом нарушают равновесие в распределении теплорода. Сжимая газ или пар, можно вызвать повышение температуры и таким образом осуществить обратный цикл. Карно рассматривает прямой и обратный циклы теплового двигателя. Первый цикл состоит в переносе теплорода от тела  $A$  к телу  $B$  с получением механической работы. В течение второго цикла теплород возвращается от тела  $B$  к телу  $A$ . Неравномерность в его распределении восстанавливается, и при этом затрачивается механическая работа.

«Но если,— говорит Карно,— действовать тем и другим образом и тем же количеством пара, и нет никаких потерь ни в движущей силе, ни в теплороде, то количество движущей силы, произведенной в первом случае, будет равно тому, которое было затрачено во втором, и количе-

ство теплорода, прошедшее в первом случае, от тела  $A$  к телу  $B$ , будет равно количеству возвратившегося во втором случае от тела  $B$  к телу  $A$ ; можно делать бесконечное число операций этого рода, так что, в конце концов, не будет ни произведенной движущей силы, ни перехода теплорода от одного тела к другому»<sup>1</sup>.

Если бы можно было получить от теплорода больше механической работы, чем с помощью идеального цикла паровой машины, то возможно было бы часть этой силы потратить на обратное возвращение теплорода от конденсатора к топке, восстановить первоначальное состояние и снова использовать его для получения механической работы. Таким образом, оказалось бы возможно непрерывно получать движущую силу без затраты теплорода и каких-либо других агентов.

«Подобное создание совершенно противоречит общепринятым идеям, законам механики и здравой физике. Оно недопустимо. Необходимо заключить, что максимум движущей силы, получаемый употреблением пара, есть также максимум движущей силы, получаемой любым средством»<sup>2</sup>.

Мы видим, что для Карно невозможность вечного двигателя — исходная аксиома физики. Именно на этой основе и доказывается необходимость температурного перепада — «падения теплорода». Переход к круговому процессу, этот поразительный по гениальному остроумию, смелости и глубине методологический прием, позволяет Карно вывести идею температурного перепада из невозможности вечного двигателя.

Огрицательная и чисто количественная характеристика неуничтожаемости движения может сочетаться и исторически сочеталась с представлением об абсолютной грани между теплотой и движением, с представлением о неуничтожаемости теплоты в ее конкретной форме и, соответственно, с мыслью о теплоте как неуничтожаемой субстанции — теплороде. С точки зрения теории теплорода можно было вывести необходимость температурного перепада из невозможности вечного двигателя. Это и сделал Карно в «Размышлениях о движущей силе огня». После работ Май-

---

<sup>1</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 23.

<sup>2</sup> Там же, стр. 24.

ера и появления кинетической теории газов уже нельзя было утверждать, будто работа возникает за счет перераспределения неуничтожаемой теплоты. Напротив, в свете механической теории тепла в паровой машине, как и в каждом другом тепловом двигателе, механическая работа возникает за счет тепла, и в конденсатор попадает при самых идеальных условиях меньше тепла, чем возникает в топке. При этих условиях температурный перепад вовсе не оказывается необходимым, и принцип необратимости представляется самостоятельным принципом, независимым от первого начала термодинамики. Клаузиус, Вильям Томсон и другие физики середины и второй половины XIX в. показали, что принцип Карно оказывается независимым и новым принципом — вторым началом термодинамики.

В середине XIX в. физика в лице Кренига и Клаузиуса вернулась к воззрениям XVII—XVIII вв., объяснявшим тепловые явления беспорядочным движением частиц. При этом молекулам присваивались прямолинейные поступательные движения от одного столкновения до другого. Эти поступательные движения объяснили давление газа, которое, согласно принципу сохранения импульса, должно было быть пропорционально средней кинетической энергии молекул с некоторым универсальным коэффициентом пропорциональности.

Генезис механической теории газов был важнейшим событием в истории атомистики, иллюстрирующим общие особенности науки XIX в., отличающие ее от науки предшествующего столетия. Уже в XVIII в. знали об иерархии дискретных частей вещества; но представление о молекулах, движения которых лежат в основе физических явлений, и атомах, движения которых лежат в основе химических реакций,— такое представление принадлежит XIX в. Только в XIX в.— и это было одним из главных фарватеров классической физики и химии — были четко определены такие понятия и соотношения физической и химической атомистики, как молекулярный и атомный вес, законы Дальтона, Авогардо и т. д. Только на этой основе идея иерархии дискретных частей вещества и специфичности физических и химических явлений стала «работать».

В дальнейшем специфичность молекулярных процессов в их отличии от макроскопических была раскрыта

статистической физикой и, в частности, статистической концепцией необратимости. Тем самым была подготовлена почва для распространения идеи статистической закономерности (с иными конкретными соотношениями и понятиями) на атомные и ядерные процессы, а в более отдаленной перспективе — и для статистической интерпретации движения элементарных частиц.

Основным содержанием развития молекулярной физики и термодинамики в третьей четверти XIX в. стало выведение макроскопических соотношений термодинамики из микроскопических, атомистических представлений кинетической теории. На этом пути обнаруживалось коренное различие между теми и другими. Подчас раздавались голоса, требовавшие исключения кинетических представлений из физики и ограничения ее задач макроскопическим описанием. Но прогрессивное развитие науки последовательно раскрывало неустранимую связь кинетических представлений с макроскопической термодинамикой и вместе с тем сложный характер этой связи.

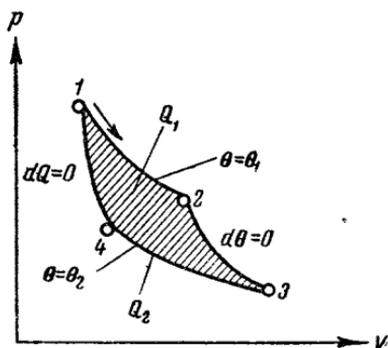
Исходным пунктом длительного конфликта и в то же время союза между макроскопической термодинамикой и кинетической теорией были работы Клаузиуса<sup>1</sup>, уже в 1850 г. связавшего принцип Карно с механической теорией тепла. Карно сопоставляет работу с теплотой, п е р е ш е д ш е й от тепла с температурой  $\Theta_1$ , к телу с температурой  $\Theta_2$ . Клаузиус же сопоставляет работу с пропорциональной ей теплотой, и с ч е з н у в ш е й при таком переходе, т. е. перешедшей в работу. Таким образом, в основе идей Клаузиуса лежит гениальная мысль, к которой Карно пришел в тридцатые годы и которую впервые обнародовал Майер: механическая работа исчезает, превращаясь в теплоту, теплота исчезает, превращаясь в механическую работу.

Клаузиус должен был представить процессы перехода тепла от нагретого тела к конденсатору и перераспределения тепла в работающем идеальном двигателе, отбросив идею неунничтожаемого запаса теплоты. Ему нужно было вместе с тем сохранить представление о перераспределении тепла (без его превращения в механическую работу и без возникновения тепла из механической работы) в

---

<sup>1</sup> Pogg. Ann., 79, 368, 500, 1850.

сочетании с новым, высказанным Майером принципом взаимного превращения теплоты в механическую работу. Нужно было связать переход тепла от одного тела к другому, т. е. процесс, о котором Карно говорил как о движении теплорода, с превращением теплоты в работу и установить количественные соотношения между этими процессами.



Это было сделано с помощью понятий адиабатического и изотермического процессов. Адиабатический процесс — это процесс, не сопровождающийся обменом тепла с внешней средой. На диаграммах, изображающих работу теплового двигателя, адиабата соединяет точки, соответствующие таким состояниям системы, через которые система может проходить без поглощения или потери тепла. На диаграмме с ординатами, изображающими давление  $p$ , и абсциссами, изображающими объем  $V$  газа, адиабата соединяет состояния (значения  $p$  и  $V$ ), возникающие одно из другого в системе, ограниченной адиабатической оболочкой, непроницаемой для тепла.

Изотермический процесс, т. е. процесс, происходящий при одной и той же температуре, требует, чтобы система поглощала либо отдавала тепло: при изменении состояния системы поддержание неизменной температуры требует теплообмена между системой и окружающей средой.

На помещенной выше диаграмме цикл Карно изображается двумя адиабатами 2 3 (участок цикла между точками 2 и 3) и 4 1 и двумя изотермами 1 2 и 3 4.

На участке цикла, соответствующем изотерме 1 2, к термодинамической системе подводится из теплового

резервуара тепло, поддерживающее температуру. Количество подведенного тепла обозначено через  $Q_1$ . Изотерма  $3\ 4$  изображает переход количества тепла  $Q_2$  в другой тепловой резервуар (конденсатор) при температуре  $\Theta_2$ . Таким образом, в результате указанных переходов система получит полное количество тепла:

$$Q = Q_1 - Q_2.$$

Рабочее тело совершает работу:

$$\oint dW = \oint p dV = W.$$

В точке  $1$  система вновь оказывается в исходном состоянии. Энергия системы — функция состояния — возвращается к первоначальному значению  $U$ . Из сохранения этой величины следует:

$$W = Q_1 - Q_2$$

Рассматриваемый Карно коэффициент полезного действия теплового двигателя  $\eta$  может быть выражен через эти величины как частное от деления произведенной работы  $W$  на количество подведенного тепла  $Q$ :

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Будем считать, что процесс, изображенный изотермой  $1\ 2$ , адиабатой  $2\ 3$ , изотермой  $3\ 4$  и адиабатой  $4\ 1$ , происходит так медленно, что потери на трение и излучение пренебрежимо малы. Тогда все состояния, через которые проходит рабочее тело, можно рассматривать как равновесные. Переход через такие состояния — обратим.

В «Размышлениях о движущей силе огня» содержалось вскользь упоминавшееся уже доказательство независимости коэффициента полезного действия описанной машины от выбора рабочего тела. Карно говорил о двух машинах с обратимыми циклами. В этих машинах применены различные рабочие тела, но тепловые резервуары и их температуры  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  одни и те же, так же как производимая каждой машиной работа  $W$ . Обозначим коэффициенты полезного действия машины для двух разных рабочих тел через  $\eta$  и  $\eta'$ , количества подводимого к ним

тепла, соответственно, через  $Q_1$  и  $Q'_1$ , а отводимого — через  $Q_2$  и  $Q'_2$  и предположим, что

$$\eta' > \eta$$

Соединим обе машины таким образом, чтобы машина, параметры которой изображены буквами со штрихами, приводила в движение другую, работающую по циклу 1 4 3 2, т. е. как холодильная машина. Если  $\eta' > \eta$ , то, как нетрудно вывести из определения этих коэффициентов,

$$\frac{|W|}{Q'_1} > \frac{|W|}{Q_1}$$

и, следовательно,  $Q_1 > Q'_1$ , т. е. тепловой резервуар будет получать больше тепла из машины с большим коэффициентом полезного действия  $\eta'$ , чем получает из него машина с меньшим коэффициентом полезного действия  $\eta$ . Разность  $Q_1 - Q'_1$  получается за счет холодного резервуара. Иными словами, тепло переходит из холодного резервуара в резервуар с более высокой температурой без каких-либо компенсирующих процессов. Из невозможности такого перехода вытекает невозможность различных коэффициентов полезного действия у машин, использующих одни и те же тепловые резервуары, но различные рабочие тела.

Клаузиус вводит далее понятие абсолютной температу-

$$T = \varphi(\Theta),$$

ры, значения которой соответствуют показаниям  $\Theta$  на произвольной температурной шкале. Он доказывает, что приращение  $dQ$  количества тепла в системе, деленное на абсолютную температуру  $T$ ,

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

представляет собой полный дифференциал и таким образом величина  $S$  — энтропия — является функцией состояния.

Существование энтропии — первое утверждение второго начала термодинамики. Оно еще ничего не говорит об изменении энтропии со временем. Если мы рассматри-

ваем в замкнутой системе лишь обратимые процессы, энтропия системы остается постоянной. Таким образом, в случае, когда все состояния замкнутой системы являются равновесными, т. е. когда система находится в тепловом равновесии, ее энтропия не меняется.

Клаузиус переходит к необратимым процессам и соответственно — ко второму утверждению учения об энтропии, к утверждению о ее возрастании. Здесь уже нельзя оперировать уравнениями (в этом — преимущество обратимых процессов); здесь можно получить лишь неравенства. Если соединить рассмотренным выше образом две машины с коэффициентами полезного действия  $\eta$  и  $\eta'$ , но на этот раз предположить, что в одной из машин (например, со штрихованными параметрами) происходит необратимый процесс, то  $\eta > \eta'$ , т. е. обратимый процесс имеет более высокий коэффициент полезного действия, чем любой необратимый процесс между теми же резервуарами, дающий такую же работу. Иными словами, для необратимого процесса требуется больше подводимого тепла:  $Q'_1 > Q_1$ . Отсюда следует неравенство:

$$\oint \frac{dQ'}{T} < 0.$$

Оно справедливо для произвольного кругового процесса, полностью необратимого либо включающего необратимые процессы, происходящие в адиабатически изолированной системе. Энтропия при таких условиях может только возрастать.

Таково (в несколько модернизированном виде) изложение второго начала термодинамики, которое мы встречаем в работе Клаузиуса «О движущей силе теплоты» (1850) и в более полной и современной форме в «Механической теории тепла» (1876).

Уже в первой из названных работ Клаузиус переходит от анализа цикла теплового двигателя к анализу космической проблемы. Это очень важный и интересный пункт исторического развития принципа необратимости. Исходный пункт генезиса этого принципа в физике XIX в. — паровая машина. Такие понятия, как тепловой резервуар, конденсатор, работа расширения газа, такие образы, как поршень, движущийся в цилиндре,—

все это не могло бы войти в физику раньше революции, произведенной паром. Но отсюда вовсе не следует, что Карно, Клаузиус и Томсон пришли к идее необратимости, непосредственно изучая тепловые двигатели. В истории науки «филогенетическое» развитие принципа не совпадает с «онтогенетическим» развитием интересов и идей ученого. Последний не должен повторять в своем творческом пути филогенетическую эволюцию и начинать с исторически исходных проблем. Кю времени, когда появились «Размышления о движущей силе огня», основные понятия, выросшие на основе паровой техники, стали общеизвестными, а интерес к принципам работы паровых двигателей в некоторых кругах отчасти трансформировался в интерес к связи и соотношению между общими, собственно физическими понятиями. Более того, поколение Сади Карно включало мыслителей, в работах которых проблемы, исторически («филогенетически») навеянные паровой техникой, приняли форму математических проблем. Достаточно упомянуть о Фурье. Мы, впрочем, рассматриваем другую линию последовательного обобщения термодинамических понятий. У Карно они еще сохраняют явную связь с теплотехникой, но отнюдь не в форме непосредственного изучения тепловых двигателей; эта явная связь видна в том, что Карно рассматривает принцип необратимости в рамках анализа идеального цикла теплового двигателя. После Карно уже нет нужды возвращаться к исходным конкретным прообразам такого двигателя; нужно идти дальше, к более общим понятиям. Заметим, между прочим, что переход ко все более абстрактным термодинамическим понятиям совпадал — логически и исторически — с переходом ко все более конкретным представлениям молекулярной механики, с последовательной конкретизацией и модификацией механических моделей кинетической теории газов. В этой области чрезвычайно явственно видно, как соотношения, казавшиеся предельно общими абстракциями, оказываются частными случаями более общих соотношений, найденных при более точном учете конкретных деталей; явственно видна условность самого противопоставления абстрактных и конкретных понятий в науке. В конце концов процесс конкретизации и обобщения (как двух сторон одной и той же тенденции) термодинамических и

кинетических представлений привел к возникновению статистической механики.

Очень интересно проследить на примере термодинамики середины XIX в. «свободный пробег» физической теории после импульса, полученного от производственно-технических запросов эпохи. Клаузиус подчеркнул одно обстоятельство, которое, конечно, было известно и Карно, но не стало у последнего основой далеко идущих выводов. Речь идет о тех условиях, при которых принцип необратимости остается справедливым, и о судьбе этого принципа при переходе к иным условиям. Карно рассматривает процесс перехода теплоты от нагретого теплового резервуара в конденсатор. Этот процесс может, как уже говорилось, происходить в обратном направлении, тепло может перейти от холодного тела к теплему, энтропия системы может быть уменьшена, если затратить механическую работу и превратить двигатель в холодильную машину. Но затраченная механическая работа могла быть сама получена за счет температурного перепада с помощью процесса, связанного с увеличением энтропии. Такой процесс в свою очередь может быть обращен за счет увеличения энтропии, сопровождающего третий процесс. Достаточно было обратить внимание на указанное обстоятельство, чтобы был сделан первый шаг от проблемы теплового двигателя к проблеме бесконечной Вселенной. Дальнейшее развитие идеи необратимости пошло именно в этом направлении и по сей день еще не закончилось какой-либо логически замкнутой концепцией. Импульсом для инфинизации принципа необратимости была необходимость непротиворечивой физической теории. Подобные «имманентные» силы развития отражают не частные запросы производства (в данном случае — теплотехники), а результаты общего хода технического, экономического и культурного развития человечества, развития, определяющего в последнем счете уровень логических, математических и собственно физических требований к развивающейся научной теории и возможности ее обобщения и конкретизации.

Клаузиус переходит к обобщению принципа Карно, указывая на условие необратимости.

«Теплота, — пишет он, — не может переходить сама собой от более холодного тела,

к более теплом у. Появляющиеся здесь слова «сама собой» требуют, чтобы быть вполне понятными, еще объяснения, которое дано мною в различных местах моих работ. Прежде всего они должны выражать, что теплота никогда не может накапливаться с помощью теплопроводности или излучения в более теплом теле за счет более холодного. При этом все то, что в этом отношении было известно об излучении уже раньше, должно быть распространено также и на те случаи, в которых вследствие преломления или отражения направление лучей как-нибудь изменяется и этим достигается известная концентрация последних. Далее, наш принцип должен относиться и к таким процессам, которые составлены из многих разнообразных явлений, как, например, круговой процесс описанного выше рода. С помощью такого процесса теплота, правда, может (как мы это видели при обращении вышеприведенного кругового процесса) перейти от более холодного тела к более теплом у: но наш принцип утверждает, что тогда одновременно с этим переходом теплоты от более холодного к более теплом у телу, должен иметь место и противоположный переход теплоты от более теплого к более холодном у телу либо должно произойти какое-нибудь другое изменение, обладающее той особенностью, что оно не может быть обращено без того, чтобы не вызвать со своей стороны посредственно или непосредственно такой противоположный переход теплоты. Этот одновременно происходящий противоположный переход теплоты или другое изменение, которое имеет следствием такой противоположный переход теплоты, должны рассматриваться как компенсация перехода теплоты от более холодного тела к более теплом у. Пользуясь этим попятием, можно слова «сама собой» заменить словами «без компенсации» и высказать вышеприведенный принцип следующим образом: переход теплоты от более холодного тела к более теплом у не может иметь места без компенсации<sup>1</sup>.

Понятие «компенсация» заставляет Клаузиуса перейти от двигателя к космосу. Такой переход предопределен самим содержанием второго начала термодинамики. Необратимость перехода тепла требует оговорки: «без компенса-

---

<sup>1</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 133—134.

ции», т. е. без другого процесса, связанного с переходом тепла от теплого тела к холодному. Значит, необратимость переходит от одного процесса к другому, охватывает Вселенную и придает физический смысл направлению времени во Вселенной.

У Клаузиуса второе начало термодинамики придает времени определенное направление, делает неравноценным два направления времени, дает реальную основу для различения положительного и отрицательного направления. Возрастание энтропии означает направленность времени. Старая концепция движения, которая не знала необратимых процессов, в сущности говоря, отрицает изменчивость мира. Даже превращение энергии без возрастания энтропии означало бы постоянное повторение одного и того же круга превращений. Клаузиус очень близко подходит к разграничению движения как повторения и движения как необратимого процесса. «Часто приходится слышать, — пишет он, — что все в мире происходит в замкнутом круге. В то время как в определенном месте и в известную эпоху одни превращения происходят в одном направлении, — в другом месте и в другую эпоху происходят другие изменения в противоположном направлении; таким образом, вообще, воспроизводятся одни и те же состояния, а состояние мира остается неизменным, если только рассматривать вещи в их совокупности и с общей точки зрения. Мир, следовательно, может продолжать существовать вечно одним и тем же образом. Когда первый основной принцип механической теории теплоты был сформулирован, его, пожалуй, можно было считать за блестящее подтверждение вышеупомянутого мнения... Но второй основной принцип механической теории теплоты противоречит этому мнению самым решительным образом... Отсюда вытекает, что состояние Вселенной должно все более и более изменяться в определенном направлении»<sup>1</sup>.

Спустя год после того как Клаузиус сформулировал второе начало термодинамики, Вильям Томсон придал ему несколько иной характер<sup>2</sup>. Томсон говорит о теплоте как о такой форме движения, которая не при всех условиях

---

<sup>1</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 133—134.

<sup>2</sup> В работе «О динамической теории теплоты», Trans. Roy. Soc. Edinb. 20, 261, 281, 475, 1851. Русск. пер. «Второе начало термодинамики», стр. 162—174.

может быть превращена в другие формы. Теорему Карно он формулирует следующим образом:

«Если какая-либо машина устроена таким образом, что при работе ее в противоположном направлении все механические и физические процессы в любой части ее движений превращаются в противоположные, то она производит ровно столько механической работы, сколько могла бы произвести за счет заданного количества тепла любая термодинамическая машина с теми же самыми температурами источника тепла и холодильника»<sup>1</sup>.

Эта теорема доказывается на основе постулата: «Невозможно при помощи неодоушевленного материального деятеля получить от какой-либо массы вещества механическую работу путем охлаждения ее ниже температуры самого холодного из окружающих предметов»<sup>2</sup>.

Томсон показывает, что предположение о существовании двух машин  $A$  и  $B$ , из которых  $A$  производит больше работы, чем  $B$ , из заданного количества теплоты, противоречит изложенному только что постулату. Операции машины обратимы, поэтому  $B$  могла бы возвращать своему источнику тепла некоторое количество тепла за счет работы, полученной из такого же количества тепла при обратном действии. Машина  $B$  может вернуть при этом в тепловой резервуар такое количество теплоты, которое было затрачено машиной  $A$ . Но это количество тепла соответствует меньшему количеству работы, чем количество работы, произведенное машиной  $A$ ; ведь машина  $B$  производит меньше работы, чем  $A$ , при том же количестве затраченного тепла. Если обе машины используют один и тот же источник тепла и один и тот же холодильник, то машина  $B$  при обратной работе забирает из холодильника больше тепла, чем передает в холодильник машина  $A$  при прямой работе. Теперь представим себе, что машина  $A$  тратит часть вырабатываемой работы на приведение в обратное движение машины  $B$ . «Мы, следовательно, имели бы автоматически действующую машину, способную непрерывно извлекать теплоту тела, окруженного другими телами с более высокой температурой, и превращать эту теплоту в механическую работу. Но

---

<sup>1</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 164.

<sup>2</sup> Там же, стр. 165.

последнее противоречит нашей аксиоме, и потому мы приходим к заключению, что гипотеза, допускающая, будто машина *A* извлекает из равного количества теплоты, взятой из источника тепла, больше механической работы, чем машина *B*, является ложной. Следовательно, при определенных температурах источника тепла и холодильника, никакая машина не может извлечь из данного количества введенного в нее тепла больше работы, чем машина, удовлетворяющая условиям обратимости, что и требовалось доказать»<sup>1</sup>.

Таким образом, Томсон излагает принцип необратимости в форме постулата, отрицающего возможность существования машины, использующей некоторый тепловой резервуар, без другого теплового резервуара с иной температурой для получения работы. Такая машина могла бы использовать неограниченный запас энергии в окружающих телах природы для вечного получения работы без нарушения закона сохранения энергии. Впоследствии Оствальд назвал указанную машину вечным двигателем второго рода. Если невозможность вечного двигателя первого рода (т. е. получения работы без эквивалентной затраты энергии) была одной из первых форм принципа сохранения энергии, то невозможность вечного двигателя второго рода (получения работы за счет одного теплового резервуара) была исторической формой второго начала термодинамики.

Вильям Томсон распространяет принцип возрастания энтропии на бесконечную Вселенную в целом. Он игнорирует условность инфинитизации физических соотношений, доказанных для конечных областей Вселенной. Такая условность сама по себе является обобщением классических теорий XIX в. Поведение систем с небольшим числом степеней свободы не подчиняется принципу необратимого возрастания энтропии. Указанному принципу подчиняется при определенных условиях поведение систем со статистически большим числом степеней свободы. Этот принцип в каждом случае уменьшения энтропии заставляет искать другой компенсирующий процесс, подчиненный принципу необратимости. Но распространяется ли закон возрастания энтропии на бесконечную Вселенную? Томсон говорит о превращении мировой энергии в теплоту,

---

<sup>1</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 166.

выделение которой сопровождает все физические процессы, и о выравнивании температуры Вселенной. Отсюда — грядущая тепловая смерть, исчезновение температурных различий и превращение всей мировой энергии в теплоту, равномерно распределенную во Вселенной. Переход к такому состоянию, означающему прекращение каких бы то ни было физических процессов, Томсон называет рассеянием энергии.

В статье «О проявляющейся в природе общей тенденции к рассеянию механической энергии» (1852) Томсон следующим образом излагает эти выводы из второго начала термодинамики:

«1. В материальном мире существует в настоящее время общая тенденция к расточению механической энергии.

2. Восстановление механической энергии в ее прежнем количестве без рассеяния ее в более чем эквивалентном количестве не может быть осуществлено при помощи каких бы то ни было процессов с неодушевленными предметами и, вероятно, также никогда не осуществляется при помощи организованной материи как наделенной растительной жизнью, так и подчиненной воле одушевленного существа.

3. В прошлом, отстоящем на конечный промежуток времени от настоящего момента, Земля находилась и спустя конечный промежуток времени она снова очутится в состоянии, непригодном для обитания человека, если только в прошлом не были проведены и в будущем не будут предприняты такие меры, которые являются неосуществимыми при наличии законов, регулирующих известные процессы, протекающие ныне в материальном мире»<sup>1</sup>.

В статье «О проявляющейся в природе общей тенденции к рассеянию механической энергии» Томсон указывает на неизбежное рассеяние той части механической энергии, которая может быть использована человеком. В случае переноса тепла от горячего тела к холодному при любом отступлении от идеального цикла часть энергии превращается в такую форму, в которой она уже не может быть использована для получения механической энергии, для последующего нарушения равновесия в распределении тепла за счет механической энергии и т. д.

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 182.

Томсон анализирует эту проблему с точки зрения кинетической теории тепла. Он различает два типа запасов энергии. «Некоторый груз, — говорит Томсон, — расположенный на определенной высоте, который может опускаться и по желанию произвести работу, наэлектризованное тело, известное количество топлива — все это содержит в себе запасы механической энергии статического вида. Массы движущегося вещества, объем пространства, через которое проходят волны света или лучистой теплоты, тело, частицы которого находятся в тепловом движении (т. е. не бесконечно холодное), содержат в себе запасы механической энергии динамического вида»<sup>1</sup>.

Томсон рассматривает уменьшение механической энергии в данном запасе и затем ее возвращение. Если теплота получена таким образом, что затраченная механическая энергия может быть получена вновь, то такой процесс называется обратимым; но для этого необходимо всегда, чтобы затрата механической энергии приводила к уменьшению равномерности в распределении тепла, т. е. к переходу тепла от холодного тела к теплomu. Напротив, когда теплота получается с помощью необратимого процесса и уже не может быть снова превращена в механическую энергию (например, при трении), то тем самым получается необратимое расточение энергии. Анализируя эти процессы с количественной стороны, Томсон приходит к заключению, что в материальном мире существует общая тенденция расточения механической энергии. Всякое восстановление механической энергии в ее прежнем количестве вызывает некоторое, более чем эквивалентное рассеяние ее в других телах. Отсюда следует, что с течением времени вся механическая энергия рассеется, тепло распределится между телами Вселенной равномерно и энергетические трансформации станут невозможными.

Идея тепловой смерти — неправомерный вывод из принципа необратимости, превращающий первое начало термодинамики в чисто формальную и отрицательную констатацию. Об этом говорит Энгельс в одном из фрагментов «Диалектики природы»<sup>2</sup>. Перспективу тепловой смерти можно опровергнуть чисто логическим образом —

---

<sup>1</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 180.

<sup>2</sup> См. Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955, стр. 229.

указанием на неправомерность применения соотношений, справедливых для конечных областей, к бесконечной Вселенной. Но гораздо трудней позитивная задача — поиски физических процессов, существование которых ограничивает рассеяние энергии некоторыми более или менее определенными областями. Больцман доказывал существование таких процессов, исходя из законов классической статистической физики; но действительное положительное решение задачи, действительное устранение противоречия легло на плечи релятивистской физики.

Ранее уже говорилось, что наука логически инфинизирует соотношения, доказанные с помощью конечного числа наблюдений для ограниченной области. Но логика сама по себе, без дополнительных постулатов (иногда без дополнительных понятий и новых, найденных экспериментом постоянных) не может определить границы правомерной (т. е. не лишаящей указанные соотношения физического смысла или достоверности) инфинизации. Такие границы могут быть часто определены лишь при переходе к более конкретной и общей теории, из которой вытекают для определенных частных случаев при определенных условиях соотношения, найденные с помощью конечного числа наблюдений. Этим соотношениям противостоят теперь более общие соотношения, найденные с помощью других наблюдений и экспериментов.

Обобщение физики XIX в. привело к идее универсального положительного принципа сохранения энергии при вечном качественном преобразовании ее форм. Тем самым была дискредитирована идея тепловой смерти для космоса. Но собственно физическая реализация развития, указываемого обобщением науки, требует новых понятий, констант и экспериментальных данных. В проблеме рассеяния энергии эти новые элементы физической картины мира появились только в XX в. Однако во второй половине XIX в. предстояло еще освободиться от некоторых традиционных представлений — прежде всего от представления, будто сохранение энергии и возрастание энтропии представляют собой логически связанные друг с другом формулировки, будто закон возрастания энтропии можно вывести из закона живых сил либо из исходных вариационных принципов механики. В действительности второе начало термодинамики логически связано с позитивным

содержанием закона сохранения, несводимым к механическому закону сохранения. Последний соответствует процессам, при которых механическая работа вовсе не переходит в тепло, а тепло — в механическую работу. Чисто механическая Вселенная, состоящая из небесных тел с температурой абсолютного нуля, находилась бы в наименее вероятном состоянии с наименьшей энтропией. Закон сохранения имел бы при этом чисто механический смысл. Вселенная с максимальной энтропией, Вселенная, в которой нет температурных перепадов и превращения тепла в работу, была бы полем действия закона сохранения энергии в совершенно плоском и бессодержательном смысле неизменности количества тепла. Нетривиальный, положительный и качественный смысл принципа сохранения энергии требует указания, в каком именно направлении будет происходить процесс превращения энергии. Такие указания дает принцип возрастания энтропии. Это утверждение отнюдь не включает идеи предустановленного «обесценения» энергии. Оно указывает лишь на те условия, при которых энтропия не может уменьшаться, а соответственно позволяет найти (и создать!) условия, при которых энтропия уменьшается.

Подобные соображения в очень яркой, на первый взгляд парадоксальной, форме высказал в 1938 г. Роберт Эмден в заметке «Почему мы топим зимой»<sup>1</sup>.

Эмден говорит, что не прибавление количества энергии, а повышение температуры (может быть, даже при неизменном запасе энергии) в комнате служит целью отопления. «На вопрос, почему мы топим зимой, неспециалист ответит: чтобы сделать комнату теплее; знаток термодинамики выразится, возможно, таким образом: чтобы подвести недостающую энергию. В таком случае правым окажется профан, а не ученый».

Такой вывод обосновывается простым расчетом, показывающим, что количество энергии при некоторых допущениях не зависит от температуры.

«Вся энергия, которую мы вводим в комнату при отоплении, уходит через поры в стенах наружу...

Почему же все-таки мы топим?»

---

<sup>1</sup> «Nature», 141, 908, 1938. А. Зоммерфельд. Термодинамика и статистическая физика, стр. 59—60.

— По той же самой причине, по которой жизнь на Земле была бы невозможна без солнечного излучения. При этом дело заключается не в попадающей на Землю энергии. Последняя будет снова излучаться вплоть до пренебрежимо малой доли, подобно тому как человек не меняет своего веса, несмотря на принятие пищи. Условия нашего существования требуют известной температуры тела, и, чтобы ее поддерживать, используется не увеличение энергии, а понижение энтропии»<sup>1</sup>.

Процессы понижения энтропии, т. е. создания менее вероятных распределений энергии играют вообще перво-степенную роль в технике. Отрицательная и количественная констатация сохранения сама по себе еще не позволяет предвидеть и соответственно использовать направление естественных процессов перехода тепла в работу и обратно. Положительная и качественная сторона принципа сохранения тесно связана с понятием энтропии, причем не максимальной и не минимальной, а изменяющейся, не достигающей, вообще говоря, ни максимальных, ни минимальных значений, возрастающей при более общих и уменьшающейся при специальных условиях. Вслед за цитированными строками Эмден пишет:

«Будучи студентом, я с пользой прочитал небольшую книгу Ф. Вальда «Царица мира и ее тень». Имелась в виду энергия и энтропия. Достигнув более глубокого понимания, я пришел к выводу, что их надо поменять местами. В гигантской фабрике естественных процессов принцип энтропии занимает место директора, который предписывает вид и течение всех сделок. Закон сохранения энергии играет лишь роль бухгалтера, который приводит в равновесие дебет и кредит»<sup>2</sup>.

Такая оценка закона сохранения энергии справедлива лишь в том случае, когда имеют в виду чисто отрицательную констатацию количественной неуничтожаемости движения. Если же придавать принципу сохранения более широкий смысл, включающий положительную и качественную сторону, то сравнение Эмдена требует модификации. Принцип сохранения играет не роль бухгалтера, а более

---

<sup>1</sup> Цит. по А. Зоммерфельду. Термодинамика и статистическая физика. М., 1955, стр. 60.

<sup>2</sup> Там же, стр. 60.

широкую и вполне «директорскую» роль. Он указывает, что сделки должны производиться (положительная сторона дела) и не должны нарушать равенства дебета и кредита (отрицательная сторона). Принцип увеличения энтропии позволяет определить, при каких именно условиях могут происходить те или иные сделки. Принцип сохранения гласит, что движение не только сохраняет определенную количественную меру при превращениях, но и неизбежно переходит из одной формы в другую. Именно в такой положительной форме принцип сохранения становится позитивной основой естествознания, развертывается в историческую картину переходов одной формы движения в другую, указывает на иерархию форм движения и, соответственно, иерархию дискретных частей вещества. Этой качественной стороной, предполагающей однородность не только пространства, но и времени, принцип сохранения энергии отличается от принципа сохранения импульса. Обо всем этом уже говорилось в предыдущей главе. Здесь мы видим, что развитие принципа сохранения энергии в его положительной форме связано с принципом увеличения энтропии. Если первый указывает на неизбежность некоторых трансформаций, то второй определяет их условия, направления и связи между ними. Логической связи соответствует историческая. Когда Энгельс в 1885 г. говорил о новом понимании принципа сохранения по сравнению с существовавшим в семидесятые годы <sup>1</sup>, то речь шла не только о развитии учения об энергии в узком смысле слова, но и об итогах исследований, посвященных энтропии.

Важным этапом развития второго начала термодинамики было выяснение его несводимости к законам механики. Без этого нельзя было создать статистическую физику. Законы механики, точным и однозначным образом определяющие состояния отдельных частиц, превращаются в статистические закономерности при таком возрастании числа степеней свободы, при котором нельзя либо нет нужды следить за поведением отдельных частиц. На этом пути естественно появляется представление о необратимом переходе от менее вероятных к более вероятным состояниям больших ансамблей. Этот путь ведет к статистической фи-

---

<sup>1</sup> См. Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. М., 1953, стр. 13.

зике, а для более отдаленного будущего продвижение по этому пути подготавливает статистическую интерпретацию самих законов механики. Статистическая физика сводит силы (например, силу давления газа на стенку сосуда) к большому числу отдельных молекулярных ударов, каждый из которых не рассматривается ввиду макроскопически континуализированного характера картины. В этом, условном смысле статистика — это теория «скрытых» процессов и «скрытых» масс. Но были попытки нестатистического, кинетического объяснения силы при помощи скрытых (без кавычек!) масс и процессов. Иными словами, сама механика с ее нестатистическими законами непосредственно привлекалась к задаче кинетического объяснения силы.

Такой путь должен был сделать принципы механики универсальными, распространить их на те области, где таилось каузальное объяснение силы, и при этом не лишать принципы механики их классического смысла, не придавать им нового статистического смысла. На указанном пути — боковом, как мы теперь знаем, — наиболее крупными вехами были работы Гельмгольца о циклических и скрытых механических движениях.

Гельмгольд был сторонником единой механической картины мира. Его известное заявление о сведении явлений природы к притягательным и отталкивательным силам, зависящим от расстояния, в работе «О сохранении силы» (1847) упоминалось в предыдущей главе. Впоследствии Гельмгольд перешел от подобного динамического монизма к кинетическому, к стремлению свести картину мира к механическим движениям. Наиболее трудной задачей было сведение к механике необратимых физических процессов. Гельмгольд полагал, что эта задача разрешима. Он заметил прежде всего, что обратимые тепловые явления могут быть выражены в форме лагранжевых уравнений движения и таким образом их можно подчинить вариационному принципу. Однако последний необходимо при таком расширении его роли несколько обобщить. Нужно изменить вид фигурирующей в уравнениях Лагранжа функции  $L$  координат и скоростей. В механике кинетическая энергия рассматривается как однородная квадратичная форма скоростей, а потенциальная энергия — как функция координат. Изменив вид функции  $L$ , можно поль-

зоваться принципом наименьшего действия, универсальным принципом всей физики обратимых явлений. Далее Гельмгольц утверждает, что из универсальной применимости принципа наименьшего действия вытекает возможность его применения к таким движениям, которые не могли быть, по крайней мере до настоящего времени, непосредственно видимы, т. е. скрытым движениям.

В творчестве Гельмгольца ясно видна характерная особенность физики XIX в. в ее отношении к механике. Не только статистические идеи, но и теории, в которых фигурировали чисто динамические закономерности, были историческим результатом развития термодинамики и электродинамики. В механических моделях молекулярных движений фигурировали массы, которые находились за макроскопической картиной, были скрыты статистической континуализацией. В механических моделях электродинамики роль скрытой массы играл эфир. Гельмгольц-механик находился под большим влиянием Гельмгольца-физика, и это влияние отражало общую тенденцию науки XIX в. Термодинамические и электродинамические идеи толкали Гельмгольца к перестройке механики на основе применения понятия скрытых масс. Отыскивая в механике понятия, аналогичные термодинамическим, Гельмгольц пришел к циклическим движениям.

В 1884 г. в работе о статике моноциклических систем и в последующих исследованиях Гельмгольц утверждал, что в природе существуют механические движения, могущие служить аналогами не только обратимых, но и необратимых термодинамических процессов. Такие движения называются циклическими.

Функция  $H$  Гамильтона — это функция всех координат и всех обобщенных импульсов системы. Иногда эта функция не зависит от одной или большего числа координат. Такие координаты называются циклическими. Например, при движении тяжелого тела в гравитационном поле Солнца или Земли потенциальная энергия зависит только от расстояния между Солнцем или Землей и рассматриваемым телом. В выражение для функции Гамильтона не входят две из трех координат тела. Эти две координаты и являются циклическими. Импульс, соответствующий циклической координате, является постоянным. Понятие циклических координат сыграло большую роль в развитии

механики — особенно в попытках кинетического объяснения ее основ. Циклические движения, где координаты не влияют на функцию Гамильтона, могут непосредственно не обнаруживаться. Отсюда шаг к представлению о «скрытых движениях».

Понятие циклических движений представляет собой обобщение тех микроскопических движений, которые не может индивидуализировать экспериментальная физика и игнорирует (рассматривает их статистический результат) термодинамика. Больцман, развивая идеи Гельмгольца о циклических движениях, в главе с характерным названием «Аналогия с физическими, особенно с тепловыми законами» говорит о существенном отличии тепловой энергии от энергии механического движения: в нагретом теле нельзя заметить внешних проявлений изменения состояния. Но и в механике возможно такое же положение. Вращение абсолютно однородного твердого шара не может быть замечено так же, как движение однородной несжимаемой жидкости без трения в замкнутом канале с абсолютно твердыми стенками. Это и есть циклическое движение. «Циклические системы в строгом смысле слова суть такие, в которых хотя и могут происходить любые движения, но только таким образом, что в случае, если какая-либо частица массы оставит свое место в пространстве, то тотчас же вступает на ее место совершенно подобная ей частица, которая имеет такую же и так же направленную скорость, которую имела первая частица в этом месте пространства. Координата только в том случае называется действительно циклической, если система производит такое движение, что только эти координаты меняются при неизменном положении остальных»<sup>1</sup>.

Молекулярные движения не являются в этом смысле строго говоря циклическими. Однако при беспорядочном движении большого числа молекул всегда можно рассчитывать, что после того, как одна молекула в данной точке изменила состояние движения, другая, соседняя, молекула приобретает такое же состояние. Поэтому можно провести далеко идущую аналогию между молекулярным движением и макроскопически циклическим движением.

---

<sup>1</sup> H. Helmholtz, Vorlesungen über die Prinzipien der Mechanik. Bd. 2, Leipzig, 1904, S. 162.

Поведение систем, имеющих циклические координаты, зависит не от самих циклических координат, а только от скорости их изменения. Поэтому в выражения живой силы и в выражения сил, действующих на такие системы, могут входить не координаты сами по себе, а лишь их производные.

С помощью понятия циклических движений Гельмгольцу удалось прийти к чисто механическому представлению о необратимости и таким образом, как ему казалось, подчинить термодинамику собственно механическим закономерностям. Но для этого пришлось предположить существование циклических движений, не поддающихся непосредственному наблюдению. Мысль Гельмгольца иллюстрируется следующим примером. Шар вращается внутри непроницаемой оболочки. Это движение нельзя обнаружить, пока система, включающая шар и его оболочку, покоится. Но если эта система движется, то нельзя заставить ее двигаться в обратном направлении путем простого изменения знака наблюдаемой скорости. Таким образом, здесь мы сталкиваемся с макроскопической картиной необратимости. Подобные ненаблюдаемые массы, совершающие циклическое движение, приводят к необратимым процессам. Далее Гельмгольд сравнительно легко устанавливает аналогию между циклическими и молекулярными движениями, позволяющую, как ему кажется, подчинить термодинамику механике.

Аналогичные попытки предпринимались и позже. В семидесятых годах XIX в. Раус дал важное обобщение теории волчков и жироскопов. Как известно, волчки и жироскопы при быстром вращении обнаруживают свойства, аналогичные свойствам системы, находящейся под воздействием силы. Кинетическая энергия при подобных движениях вызывает такие же явления, как и некоторая дополнительная потенциальная энергия. Во второй половине восьмидесятых годов Дж. Дж. Томсон, стремясь полностью свести потенциальную энергию к кинетической, хотел опереться на результаты Рауса. По мнению Томсона, все проявления потенциальной энергии являются проявлением кинетической энергии скрытых движений. В кавендишевских лекциях, прочитанных в 1886 г.<sup>1</sup>, Том-

<sup>1</sup> J. J. Thompson. Applications of Dynamics to Physics and Chemistry, 1889.

сон рассматривал ряд физических проблем с точки зрения совпадения наблюдаемой потенциальной энергии с кинетической энергией скрытых движений. Томсон рассматривает зависимость свойств тела от температуры, явления термоэлектричества, испарения, свойства разведенных растворов, химическое равновесие и другие явления. Общим результатом таких попыток Томсон считает непоколебимость универсального тезиса классической физики: все физические явления могут быть объяснены на основе динамических принципов. Однако Томсон видит, что второе начало термодинамики не может считаться собственно динамическим принципом. Положение — как будто спасают принцип Гамильтона и уравнения Лагранжа. Однако, применяя динамические принципы, мы приходим к величинам, которые не могут быть непосредственно сравниваемыми с измеримыми величинами термодинамики, например с температурой. Переход от механических понятий к собственно физическим не всегда может быть сделан. Поэтому Томсон считает основным преимуществом динамических принципов возможность раскрыть отношения между свойствами тел без проникновения в механизм взаимодействия этих тел.

В семидесятые годы и Клаузиус попытался вывести второе начало термодинамики из принципа наименьшего действия. Оказалось, однако, что в термодинамике принцип наименьшего действия приобретает по сравнению с механикой иной физический смысл и требует введения новых, статистических понятий, не свойственных классически механическому пониманию принципа. Этот результат означал ограничение роли принципа наименьшего действия в науке. Молекулярные явления не сводятся к механике и, соответственно, закономерности молекулярных явлений не сводятся к основному принципу механики. Но они несводимы к нему, так же как и вообще термодинамика несводима к механике, не в каком-либо абсолютном, метафизическом смысле: несводимость не противоречит необходимости механических моделей. Следует отметить, что в семидесятые годы никто еще не помышлял об обратном, т. е. о выведении принципа наименьшего действия и других принципов механики из немеханических, собственно физических закономерностей, из их несводимого к механике содержания. Между тем

такая возможность в потенции уже содержалась в той формулировке принципа наименьшего действия, которая была дана Гамильтоном. Но она не могла быть реализована ни в XIX, ни в первой половине XX в.

Необратимость физических процессов все же вошла в единую картину мира, включавшую также представления об обратимых процессах и их механической основе. Но вместе с тем в картину мира вошло представление о статистических закономерностях. Появились статистическая физика и статистическая механика.

Применение статистических закономерностей к проблемам теории теплоты и теории газов мы встречаем в ряде работ Максвелла, появившихся в шестидесятые годы.

Максвеллова теория газов интересна с исторической точки зрения как переход к условному применению механических моделей в физике и к пониманию статистического характера закономерностей физики.

Работы Максвелла, посвященные кинетической теории газов, отличаются широким применением физических аналогий и наглядных моделей; однако здесь аналогии и модели существенно отличаются от моделей, примененных Максвеллом в его электродинамических построениях. Первоначально, в 1859 г., Максвелл рассматривал молекулы как упругие тела. В дальнейшем, во второй работе, опубликованной в 1866 г.<sup>1</sup>, он считает возможным не вводить в свои расчеты конечные размеры молекул, и рассматривает их как центры, отталкивающие друг друга обратно пропорционально пятой степени расстояния. В рамках макроскопической теории мельчайшие упругие тела конечных размеров играют роль вспомогательной иллюстрации, и во второй работе в пределах такого макроскопического исследования Максвелл считает возможным обойтись без нее, заменить ее условной картиной отталкивающих друг друга точечных центров.

Максвеллова теория газов непосредственно примыкает к работам Клаузиуса. В обзорной лекции, прочитанной в 1875 г. в Лондонском химическом обществе, Максвелл говорит, что основная заслуга Клаузиуса состоит в созда-

---

<sup>1</sup> On the dynamical theory of gases. Phil. Mag., 35, 129—145, 185—217, 1866; 37, 390—393, 1866.

нии новой области математической физики, в таком физическом обобщении, которое позволило применить математические приемы к изучению систем, состоящих из бесчисленного множества движущихся молекул<sup>1</sup>. Распределив молекулы по группам соответственно их скорости, Клаузиус вместо невозможного наблюдения событий, относящихся к отдельным молекулам, учитывал изменения числа молекул в различных группах, характеризуемых определенными скоростями. «Следуя этому методу, единственно возможному как с точки зрения экспериментальной, так и математической,— говорит Максвелл,— мы переходим от строго динамических методов к методам статистики и теории вероятностей. При столкновении двух молекул они переходят из одной группы в другую; но за время большого числа столкновений число молекул, вступающих в каждую группу, в среднем не больше и не меньше числа покинувших ее за тот же промежуток времени. Когда система достигла этого состояния, число молекул в каждой группе должно быть распределено согласно некоторому определенному закону». Именно этот закон Максвелл и решил установить. Формулировка закона распределения числа молекул по скоростям и содержалась в работе Максвелла 1859 г.

В работах по кинетической теории газов и в обзорных статьях и лекциях Максвелл всегда подчеркивал необратимость молекулярных процессов. В докладе математической и физической секциям Британской ассоциации «О соотношении между математикой и физикой» Максвелл говорил, что «одним из самых замечательных результатов успехов учения о молекулах является тот яркий свет, который наука пролила на природу необратимых процессов, т. е. процессов, которые всегда направлены в сторону какого-либо предельного состояния и никогда не совершаются в обратном направлении»<sup>2</sup>. Максвелла особенно интересовало соотношение между механическими макроскопическими понятиями и закономерностями термодинамики, с одной стороны, и микроскопическими моделями,— с другой. В рамках макроскопической теории

<sup>1</sup> On the dynamical evidence of the molecular constitution of bodies. Quart. Journ. Chem. Soc. (London), 13, 493, 1875.

<sup>2</sup> Adress to the Mathematical and Physical Section of the Brit. Assoc., Brit. Assoc. Rep., 40, 1, 1870.

Максвелл рассматривал молекулы как вспомогательные модели, но, переходя к миру микроскопических процессов, которые в последнем счете определяют макроскопические явления, он утверждал физическую реальность молекул и их движений, подчиненных законам классической механики.

В рамках макроскопической теории Максвелл оперирует усредненными величинами и статистическими закономерностями и видит, что этот круг макроскопических понятий отличается от понятий механики, что закономерности, управляющие состоянием бесчисленного множества молекул, отличаются от простых механических закономерностей и требуют соответственно новых математических понятий и методов. Здесь Максвелл подходит к границам механического объяснения природы, к пониманию несводимости сложных форм движения к законам механики. Но за статистическими закономерностями макроскопической теории стоит механика молекул. Таким образом, здесь лишь макроскопические понятия приобретают немеханическое содержание. Достаточно перейти к иным масштабам, и сразу же восстанавливаются позиции механики; перед нами оказываются простые, обратимые процессы, механические столкновения движущихся молекул. Мостом между макроскопическими понятиями теории газов и механикой Ньютона служило то, что Максвелл назвал аналогией. Для микропроцессов механические модели были не только аналогиями; здесь тепловые и механические явления представлялись тождественными по своей природе. В статье «О фарадеевых силовых линиях», говоря о методе аналогий применительно к теории электричества, Максвелл указывает на классический пример — аналогию между несводимыми к механике макроскопическими законами термодинамики и ньютоновой теорией тяготения.

«Законы теплопроводности в однородных средах кажутся на первый взгляд в физическом отношении как нельзя более отличными от законов притяжений. Величины, которые мы встречаем в этих новых явлениях, суть температура, поток тепла, теплопроводность. Слово сила чуждо этой области науки. Несмотря на это, мы находим, что математические законы стационарного движения тепла в однородных средах тож-

дественны по форме с законами притяжений, будучи обратно пропорциональными квадрату расстояния. Заменяя центр притяжения источником тепла, ускоряющее действие притяжения — тепловым потоком, потенциал — температурой, мы преобразуем решение задач о притяжении в решение соответствующих задач по теплопроводности»<sup>1</sup>.

Когда Лагранж вводил понятие обобщенных координат, последние могли скрывать и немеханические величины; но пока не было физически установлено реальное существование таких величин, не могло быть и речи о подобии механических и немеханических понятий в том смысле, какой придавал этому слову Максвелл. Макроскопическая термодинамика была такой областью науки, где уже приходилось пользоваться немеханическими, физическими понятиями. В теории электричества аналогии приобрели новый смысл, так как здесь за немеханическими макроскопическими понятиями уже не стояли элементарные процессы, тождественные по своей природе с механическими.

Несмотря на глубину и оригинальность статистических концепций Максвелла, подлинным создателем статистической физики следует считать Больцмана, а исходным пунктом статистической физики служит *H*-теорема Больцмана, в которой дана статистическая интерпретация второго начала термодинамики. *H*-теорема содержалась в работе Больцмана, опубликованной в 1872 г. Больцман вводит функцию *H* — средний логарифм функции распределения. Далее Больцман указывает распределение скоростей молекул, которое одно только удовлетворяет условиям статистического равновесия. Функция *H* (с обратным знаком) — аналог энтропии; она измеряет вероятность данного распределения молекул. Распределение Больцмана, соответствующее требованию статистического равновесия, наиболее вероятно, и в состоянии равновесия энтропия не растет.

В 1886 г. в докладе, прочитанном на заседании Венской Академии наук, Больцман дал общую характеристи-

---

<sup>1</sup> Дж. К. Максвелл. Избр. соч. по теории электромагнитного поля. М., 1954, стр. 14.

ку статистических закономерностей. Он спрашивает, почему индивидуальное существование молекул, движущихся независимо одна от другой, не приводит к макроскопическим эффектам, например к тому, что в горизонтальном металлическом стержне то один, то другой конец становится теплее, так как в нем в результате случайных изменений скоростей движущихся молекул сосредоточиваются молекулы с большими скоростями. Мы никогда не наблюдаем подобного эффекта, так же как не наблюдаем неожиданного повышения плотности газа в результате совпадения движений многих молекул, направленных к этому пункту. Больцман ссылается на примеры статистических закономерностей, широко известные благодаря развитию демографической и социальной статистики. Пока существенно не изменяются внешние обстоятельства, число так называемых добровольных поступков, например преступлений, самоубийств и т. д., число случайных поступков (например, число писем, опущенных в почтовый ящик без адреса), число рождений, смертей и болезней остается для больших масс населения неизменным. «И в области молекулярных явлений дело происходит подобным же образом», — говорит Больцман. Эта ассоциация показывает не только корни статистических идей в сознании самого Больцмана, т. е. «онтогенез» статистической физики в творчестве мыслителя, но также действительную историческую связь между демографической статистикой и статистической физикой — «филогенез» последней. Образы демографической статистики так же воздействовали на интуицию физика, как строгие выводы математической теории вероятностей на математический аппарат термодинамики.

Больцман говорит, что давление газа на некоторый поршень происходит благодаря суммированию ударов молекул, направленных под различными углами и нанесенных с различной силой. Но при большом числе молекул в среднем на каждый сколь угодно малый наблюдаемый участок поршня приходится одна и та же средняя интенсивность ударов молекул. Поэтому увеличение давления газа заставляет ученого искать некоторую внешнюю причину, нарушающую статистическое равновесие и заставляющую молекулы предпочитать указанный участок другим.

Из идеи статистической закономерности Больцман непосредственно выводит необратимость молекулярных процессов. Энергия переходит из менее вероятной формы в более вероятную. В случае, когда первоначальное распределение энергии в телах было менее вероятным, в дальнейшем вероятность распределения будет увеличиваться.

При полной беспорядочности движений молекул нет оснований предполагать, что в одной части тела скорости молекул будут в среднем отличаться от скорости молекул в другой части. Если по какой-нибудь причине такое состояние возникнет, то в дальнейшем при полной беспорядочности молекулярных перемещений оно сменится более вероятным равномерным распределением температуры. Поэтому тепло и переходит от нагретого тела к холодному. Вероятность этого конечного состояния системы больше, чем начального, или, что тоже самое,— энтропия системы в течение этого необратимого процесса увеличилась.

В докладе в Венской Академии наук в 1886 г. о втором начале термодинамики Больцман излагает общий смысл своих воззрений. Исходный тезис — однозначное направление всех энергетических трансформаций. Энергия не может произвольно трансформироваться из одной формы в другую; она переходит из менее вероятной формы в более вероятную. Если первоначальное распределение энергии не соответствует наибольшей вероятности, то в дальнейшем энергия перераспределяется так, что в каждый данный момент ее распределение соответствует большей вероятности, чем в предыдущий. Формы энергии, используемые в производстве, часто оказываются наименее вероятными. Больцман приводит пример механического перемещения тел. Чтобы тело двигалось, необходимо совершенно одинаковое перемещение всех его молекул; иначе говоря, необходимо, чтобы молекулы, движущиеся с самыми различными скоростями в полном беспорядке, приобрели бы, все как одна, равные скорости. Если бы удалось достичь полной согласованности в движениях молекул, то энергия целиком перешла бы из одной формы в другую. С точки зрения закона превращения энергии согласованное движение молекул оказывается более высокой формой энергии. Но это синоним наименьшей вероятности. При всякой энергетической трансформации некоторая часть молекул отклоняется от согласованности

и переходит к более вероятному состоянию, т. е. к беспорядочному движению. Если мы встречаем где-либо температурный перепад, то молекулы всегда будут двигаться так, что маловероятное распределение будет превращаться в более вероятное. Положение, когда в одной части пространства сосредоточились молекулы с большими скоростями, а в другой части — молекулы с меньшими скоростями, представляется мало вероятным. Наибольшей вероятности соответствует равномерное распределение скоростей молекул в пространстве. Однако превращение энергии связано именно с «невероятным» распределением скоростей молекул. При выравнивании температуры теплота может быть использована для превращения в другие формы энергии.

«Температура выравнивается, но, если мы изберем окольный путь, то сможем использовать имеющуюся налицо невероятность в распределении энергии и на ее счет получить другие невероятные формы энергии, которые сами по себе не могли бы образоваться. Мы можем при переходе теплоты от более горячего тела к более холодному часть перешедшей теплоты превратить в видимое движение или в работу, что имеет место в паровых и во всех тепловых машинах. То же самое возможно всякий раз в том случае, когда распределение энергии сначала не соответствует законам вероятности, например, когда тело холоднее окружающей его среды, когда в вазе молекулы в одном месте теснее скучены, в другом рассеяны более редким образом и т. д.»<sup>1</sup>

Можно математически определить степень вероятности каждого распределения энергии. Величина, которая соответствует степени вероятности, — это и есть энтропия. При всех энергетических процессах, которые происходят сами по себе, энтропия увеличивается. В тех случаях, когда энтропия тела уменьшается, соответственно увеличивается энтропия других тел. При этом «соответственно» означает «в той же или в большей степени». Следовательно, общей основой превращения энергии является некоторый запас «невероятности». Для солнечной системы она состоит в различии между температурой Солнца и планет. Сама по себе энергия не может быть основой для превра-

---

<sup>1</sup> Цит. по сб. «Философия науки», ч. I. М.—Пг., 1923, стр. 152.

щения в другие формы. Именно отсюда вытекает невозможность практически использовать энергию как таковую при равномерном, наиболее вероятном ее распределении. Во всех окружающих нас телах находится громадное количество теплоты, но мы не можем использовать ее, так как она распределена равномерно, вероятным образом. Напротив, Солнце и Земля образуют гигантский и практически неисчерпаемый температурный перепад.

«Выравнивание температуры между обоими телами, обусловленное стремлением к большей вероятности, длится вследствие их громадных размеров и расстояний друг от друга миллионы лет. Промежуточные формы, которые принимает солнечная энергия, пока она не деградирует до температуры Земли, могут быть довольно невероятными формами энергии, и мы легко можем использовать переход теплоты от Солнца к Земле для совершения работы, как переход воды от парового котла к холодильнику. Поэтому всеобщая борьба за существование живых существ не является борьбой за составные элементы — составные элементы всех организмов имеются налицо в избытке в воздухе, воде и недрах Земли — и не за энергию, ибо таковая содержится в изобилии во всяком теле, к сожалению, в форме непревращаемой теплоты. Но это — борьба за энтропию, которую можно использовать при переходе энергии с горячего Солнца к холодной Земле. Для того чтобы возможно более использовать этот переход, растения распускают неизмеримую поверхность своих листьев и заставляют солнечную энергию, прежде чем она опустится до уровня температуры земной поверхности, выполнить химический синтез, пока еще неисследованным способом, о котором мы в наших лабораториях еще не имеем никакого понятия. Продукты этой химической кухни являются предметом борьбы в мире животных»<sup>1</sup>.

Для Больцмана крайне характерно сочетание подобной собственно физической и философской трактовки идей статистической закономерности и необратимости с количественно-математическим конструированием понятий, выражающих меру вероятности состояний статистических ансамблей.

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 155—156.

В 1906 г. Макс Планк в первом издании лекций о тепловом излучении написал формулу, выражающую основную мысль Больцмана,— интерпретацию энтропии как логарифма вероятности состояния системы. Формула эта —

$$S = k \ln W$$

высечена на памятнике Больцману над его могилой на кладбище в Вене. Нужно сказать, что Больцман говорил лишь о пропорциональности энтропии и логарифма вероятности состояния. Такую пропорциональность (коэффициент  $k$  в качестве постоянной введен Планком) Эйнштейн и назвал принципом Больцмана. Эйнштейн пользовался впоследствии обратной формулой —

$$W = e^{S/k},$$

чтобы определить вероятность состояния по энтропии, найденной экспериментальным образом.

Вероятность состояния статистического ансамбля определяется в теории Больцмана на основе следующих соображений. Представим себе множество молекул, обладающих различными скоростями. Скоростью  $v$  обладает  $n_v$  молекул. Каким образом  $n_v$  зависит от  $v$ , иными словами, каков закон распределения скоростей?

Именно этот вопрос и исторически, и логически был исходным пунктом широкого и систематического включения в физику статистических понятий и методов теории вероятностей.

Более простым вопросом является вопрос о распределении не скоростей, а числа молекул газа во всем объеме. Здесь мы подходим к классическим примерам статистического распределения. Если бросать зерна на расчерченные по некоторой поверхности клетки, то распределение зерен по клеткам каждый раз будет зависеть от неучитываемых, уравнивающих друг друга и при большом числе бросаний — несущественных по отдельности, случайных обстоятельств. В результате большого числа бросаний зерна распределяются по клеткам соответственно вероятности; причем закон, определяющий вероятное распределение, и будет существенным для решения макроскопической задачи. Разумеется, рассматриваемая

поверхность порядка нескольких квадратных метров может оказаться микроскопической при решении задачи, относящейся к посевной площади в несколько гектаров, и в этом случае закономерности распределения зерен на поверхности в несколько метров сами будут рассматриваться как несущественные и игнорируемые. При попытке обобщения соотношения между случайным и закономерным мы сразу приходим к иерархии статистических ансамблей, из которых каждый является полем действия некоторого закона, определяющего для данного ансамбля вероятность, осуществляющуюся при статистическом суммировании случайных величин.

В кинетической теории газов в качестве случайных величин фигурируют положения, скорости, энергии отдельных молекул, а в качестве статистических, макроскопических законов — законы, определяющие вероятные и средние числа молекул, обладающих заданным положением, скоростью и энергией. Пусть перед нами вместо клеток на поверхности — клетки ящика, наполненного газом. В каждый момент в первой клетке содержится  $n_1$  молекул, во второй —  $n_2$ , в третьей —  $n_3$  и т. д.

В течение некоторого конечного времени в первой клетке в среднем в каждый момент будет  $n_1$  молекул, во второй —  $n_2$  и т. д.; теперь числа  $n_1, n_2, \dots, n_z$  означают средние числа молекул.

Совпадает ли такое среднее распределение с наиболее вероятным?

Чтобы ответить на этот вопрос утвердительно, нужно предположить, что состояния молекул в каждый момент времени независимы друг от друга. Из такого предположения и исходит статистическая физика. С точки зрения обычной, нестатистической механики состояния частиц определены предшествующими состояниями. Такова микроскопическая картина молекулярных движений. Но в макроскопической статистически-усредненной картине по истечении макроскопически короткого промежутка времени роль начальных состояний стирается и распределение положений и скоростей целиком определяется вероятностью.

Распределение частиц по клеткам ящика описывается числами  $n_1, \dots, n_z$ . Сумма всех этих чисел равна  $n$  — числу всех молекул в ящике. Объемы клеток  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_z$  дают

в сумме объем ящика, который мы примем за единицу. Подсчитаем число способов, которым может быть осуществлено каждое распределение. Это число различных способов играет большую роль в статистике. Оно называется иногда числом комплексий, но наиболее употребительно название «статистический вес».

Подсчитаем число комплексий — способов, которым может быть осуществлено данное распределение молекул по клеткам ящика или вообще распределение некоторого числа  $N$  объектов по различным возможным для них состояниям. Каждый раз, когда два объекта меняются ролями, так что первый индивидуум оказывается в состоянии, в котором был второй, а второй — в состоянии первого, мы получаем новую комплексию того же состояния. Конечно, новая комплексия получается при этом, если объекты находятся в различных состояниях; перестановка объектов, находящихся в одном и том же состоянии, не дает новой комплексии. Пусть, например, три объекта  $a$ ,  $b$  и  $c$  могут находиться в двух состояниях, причем два объекта находятся в первом состоянии, а один — во втором. Такое распределение может быть осуществлено тремя комплексиями: 1)  $a$  и  $b$  в первом состоянии,  $c$  — во втором; 2)  $a$  и  $c$  — в первом,  $b$  — во втором; 3)  $b$  и  $c$  в первом,  $a$  — во втором.

Возьмем иное распределение состояний: в первом состоянии три объекта, во втором — ни одного. Такое распределение может быть осуществлено одной комплексией:  $a$ ,  $b$  и  $c$  в первом состоянии. Очевидно, число комплексий это число перестановок  $N$  объектов, исключая перестановки объектов, находящихся в одном и том же состоянии.

Возвращаясь к объектам — молекулам и к состояниям — местоположениям в той или иной клетке ящика, мы определяем число перестановок молекул. Оно равно  $n!$ . В это число входят перестановки  $n_1$  молекул, находящихся в первой клетке,  $n_2$  молекул, находящихся во второй клетке, и т. д. Число комплексий каждого заданного распределения молекул по клеткам равно:

$$\frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_z!}.$$

Далее, вероятность нахождения молекул в первой клетке зависит от ее объема  $\omega_1$ , во второй — от  $\omega_2$ , и т. д., причем

вероятность нахождения всех  $n_i$  молекул в  $i$ -ой клетке равна  $\omega_i^{n_i}$ . Поэтому выражение вероятности распределения включает произведение  $\omega_1^{n_1} \omega_2^{n_2} \dots \omega_z^{n_z}$ . Вероятность данного распределения тогда будет:

$$W = \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_z!} \omega_1^{n_1} \omega_2^{n_2} \dots \omega_z^{n_z}.$$

Не продолжая дальше вычислений вероятностей, заметим, что они позволили определить наиболее вероятное распределение молекул по клеткам ящика, соответствующее максимуму логарифма  $W$ : количество молекул в каждой клетке при таком распределении пропорционально объему клеток, так как молекулы распределены равномерно.

Аналогичное вычисление распределения скоростей молекул дает уже не столь простой результат. При вычислении такого распределения вводится особое пространство скоростей. Для этого достаточно отложить векторы скорости от некоторой точки; совокупность точек, соответствующих концам этих векторов, образует указанное пространство.

Выражение «конец вектора скорости молекулы находится в данной точке пространства скоростей» означает, что молекула обладает данной скоростью. Разделим пространство скоростей на клетки и выразим распределение скоростей молекул числами  $n_1, n_2, \dots, n_z$  векторов, концы которых попадают в каждую клетку. Кроме требования, чтобы  $n_1 + n_2 + \dots + n_z = n$ , теперь необходимо еще, чтобы сумма энергий молекул была равна полной энергии газа  $E$ . Если  $\varepsilon_l$  — энергия молекулы, вектор скорости которой попадает в клетку  $l$  пространства скоростей (короче: молекулы, находящейся в клетке  $l$ ), то энергия всех молекул в клетке  $l$  равна  $n_l \cdot \varepsilon_l$  и

$$n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots + n_z \varepsilon_z = E.$$

Указанным условиям соответствуют определяемые из них постоянные величины  $A$  и  $\beta$ , входящие в больцманово распределение скоростей

$$n_l = \omega_l A e^{-\beta \varepsilon_l}$$

Из этого выражения видно, что число молекул в клетке зависит не только от величины клетки, но и от энергии: в клетку того же размера, но с большей энергией входит меньшее число частиц, оно падает с увеличением энергии по экспоненциальному закону.

Из подобных соображений исходил Больцман, сопоставляя энтропию системы логарифму вероятности распределения скоростей молекул при данном состоянии системы.

Представление об указанном смысле энтропии и о статистической природе второго начала термодинамики стало более отчетливым после оживленной дискуссии, в которой участвовали Лошмидт, Пуанкаре, Цермело и другие физики и математики.

В 1876 г. Лошмидт<sup>1</sup> указал на невозможность произвольно длительного состояния равновесия статистического ансамбля молекул. Представим себе,— писал Лошмидт,— что распределение скоростей молекул приблизилось к максвелловскому, т. е. наиболее вероятному распределению, и в это время все скорости изменили знак. Тогда ансамбль прошел бы все предыдущие состояния в обратном порядке. Но в этом случае система неизбежно пройдет через состояния, отличающиеся только знаком скоростей от состояний, существовавших до установления равновесия. Иными словами, система вернется к менее вероятному состоянию, состоянию с меньшей энтропией.

Отвечая Лошмидту, Больцман доказывал, что неизбежные отклонения от состояния равновесия сменяются в свою очередь изменениями, приближающими систему к равновесию.

Замечания Пуанкаре<sup>2</sup> и Цермело<sup>3</sup> в основном состояли в констатации неизбежности возвращения статистического ансамбля к уже пройденному состоянию. Можно показать — это сделал Пуанкаре,— что система, движущаяся так, что значения ее обобщенных координат и импульсов лежат между некоторыми конечными пределами, через достаточно длительный промежуток времени подойдет как угодно близко к начальному состоянию. Цермело выводит отсюда, что замкнутое конечное множество молекул газа

<sup>1</sup> Wien. Ber., 2. 73. 1876.

<sup>2</sup> C. R., 108, 550, 1889.

<sup>3</sup> Ann. Phys. Chem., 57, 485, 1896; 59, 793, 1896.

(например, газ в жестком сосуде) не может прийти к равновесию, а будет через достаточно большие промежутки времени возвращаться к неуравновешенному состоянию с меньшей энтропией. Например, смесь двух газов с течением времени вновь придет к состоянию, при котором молекулы одного газа соберутся в одной части сосуда, а молекулы другого газа — в другой.

Больцман ответил, что сроки возвращения газа в менее вероятное состояние настолько велики, что практически можно пренебречь возможностью возвращения. Замечания Лопшмидта, Пуанкаре и Цермело не противоречат статистической теории Больцмана. «То обстоятельство, — пишет Больцман, — что замкнутая система очень большого числа механических элементов, если время движения этой системы длится произвольно долго, должна снова еще раз принять маловероятное состояние, не есть опровержение теорем теории газов; напротив, оно само вытекает из последних, ибо для замкнутой системы конечного числа материальных точек вероятность того, что эта система примет произвольное состояние, отличное от состояния теплового равновесия, правда, чрезвычайно мало, но никогда математически не может быть равно нулю»<sup>1</sup>.

Больцман говорит, что вероятность разделения двух диффундировавших друг в друга газов настолько мала, что в реально обозримые сроки такое разделение практически не может наблюдаться, так же как не все дома большого города не могут загореться одновременно от случайных причин.

Таким образом, сам процесс перехода от менее вероятных состояний к более вероятным является лишь более вероятным и не исключает противоположных переходов. Эта концепция получила подтверждение в 1905—1913 гг. в результате работ Альберта Эйнштейна и Мариана Смолуховского<sup>2</sup>. Взвешенные в жидкости так называемые броуновские частицы в результате «невероятных» флюктуаций движутся макроскопически. Результаты наблюдения движений броуновских частиц соответствуют результатам, полученным теоретически Эйнштейном и Смолуховским на основе статистической концепции Больцмана.

---

<sup>1</sup> «Второе начало термодинамики», стр. 224.

<sup>2</sup> Там же, стр. 232—292.

Идею вероятности перехода к более вероятным состояниям можно изложить следующим, более систематическим образом.

Механические процессы обратимы: уравнения механики, в которые входит время  $t$ , симметричны по отношению к замене  $t$  на  $-t$ . Процессы, при которых энтропия возрастает, не противоречат указанным уравнениям. Соответственно им не должны противоречить процессы, сопровождающиеся уменьшением энтропии и состоящие в переходе системы через те же конфигурации, что и в первом случае, но в обратном порядке. Но не противоречат ли такие обратные процессы второму началу термодинамики?

Сами по себе они не противоречат принципу возрастания энтропии, так как этот принцип управляет лишь вероятностью процессов, которой соответствует их действительное течение только при достаточно большом числе степеней свободы. Возьмем макроскопическое состояние системы и большое число микроскопических состояний, которые заданы координатами и импульсами молекул и создают это макроскопическое состояние<sup>1</sup>. Принцип возрастания энтропии относится к макроскопическому состоянию. В отношении микроскопических состояний он означает лишь, что подавляющее большинство микроскопических состояний изменяется таким образом, что энтропия системы в следующий момент возрастет или в предельном случае останется той же. Но если рассматривать предшествующий момент, то микроскопические состояния в своем подавляющем большинстве могли давать в этот момент меньшую величину энтропии, чем в данный, так что большинство микроскопических состояний вышло из состояний с большей энтропией. Маловероятно, а при большом числе степеней свободы практически невозможно дальнейшее уменьшение энтропии. Такой вывод не очевиден и требует более подробных пояснений.

Пусть некоторая замкнутая система пребывает в состоянии статистического равновесия в течение очень длительного времени. Промежуток времени настолько велик, что имеют место флуктуации: максимальное значение энтропии, свойственное системе в равновесии, сменяется

<sup>1</sup> См. Л. Ландау и Е. Лифшиц. Статистическая физика. М.— Л., 1940, стр. 28—31.

в крайне редких случаях и на очень краткие сроки иными значениями, отличными от максимального. Представим себе множество таких состояний, маловероятных, но неизбежно появляющихся в виде флуктуаций в течение достаточно долгого срока. Множество это достаточно велико, чтобы говорить о вероятности определенных отклонений от максимального значения энтропии. Если взять некоторое определенное макроскопическое состояние системы, состояние, в котором энтропия отличается от максимального значения, то вероятнее всего в этом состоянии отклонение системы от статистического равновесия достигло наибольшей степени и теперь начинается возврат к равновесию. Поэтому в подавляющем числе флуктуаций система достигает наибольшего отклонения от равновесия и после этого возвращается к равновесию. Значит в момент, когда состояние системы достигло в результате флуктуации определенного отклонения от равновесия, вероятным является прекращение отклонения. В подавляющем числе случаев энтропия достигла минимума и дальше будет возрастать. Вероятность флуктуаций, которые приведут к дальнейшему уменьшению энтропии, очень мала. Дело в том, что чем больше отклонение системы от равновесия, тем оно менее вероятно.

Таким образом, статистика флуктуаций в системе, достигшей равновесия, приводит к выводу: каждому флуктуационному возрастанию энтропии соответствует в подавляющем большинстве случаев предшествующее уменьшение энтропии.

Иное положение в системе, не достигшей равновесия. Если система замкнута в течение сравнительно малого времени (по сравнению со временем релаксации, т. е. перехода к наиболее вероятному состоянию термодинамического равновесия), то энтропия уже не является постоянной, она изменяется монотонно.

Эти соображения были применены ко Вселенной, рассматриваемой как замкнутая система. Если во Вселенной действуют статистические законы, то каждому процессу, сопровождающемуся увеличением энтропии, должен соответствовать процесс, сопровождающийся уменьшением энтропии. И те и другие процессы представляют собой флуктуации — отклонения от равновесия. В целом же Вселенная должна находиться в равновесии. Но такое

предположение противоречит совокупности опытных данных: окружающая нас Вселенная, насколько мы можем ее охватить, развивается в одном направлении, переходит от менее вероятных состояний к более вероятным, время имеет одно направление и процессы возрастания энтропии отнюдь не обладают соответствующими дополнениями — процессами уменьшения энтропии.

Отсюда следует, что Вселенная, какой мы ее видим, либо не подчиняется статистике, либо не замкнута и поэтому не находится в равновесии, при котором энтропия может вследствие флуктуаций изменяться в обе стороны.

Но, может быть, «Вселенная, какой мы ее видим», иными словами, вся доступная нашему наблюдению часть Вселенной — это незамкнутая область, где равновесие нарушено гигантской флуктуацией. Именно так Больцман рассматривает известную нам часть Вселенной в известный нам период. Это — затухание космической флуктуации. Раньше флуктуация развивалась, т. е. все процессы сопровождалось уменьшением энтропии. Тепло тогда переходило от холодного тела к горячему, звезды соответственно поглощали, а не излучали энергию. Теперь мы присутствуем при ликвидации такого космического нарушения наиболее вероятного хода событий.

В бесконечной Вселенной сфера величиной с нашу Галактику представляется ничтожно малой областью, в которой может происходить маловероятный переход от более вероятного состояния к менее вероятному. Если вероятность данного состояния равна  $10^{-50}$ , то это значит, что данная комбинация с большой вероятностью осуществится, когда общее число комбинаций превысит  $10^{50}$ . «Если мы, поэтому, предположим мир достаточно великим, то в нем, согласно законам теории вероятностей, могут появляться места размерами с наш звездный мир с маловероятным распределением состояний. Как при их образовании, так и при их разрушении временное течение процессов будет односторонним, и если в этих местах находятся мыслящие существа, то они должны получить о времени то же самое представление, какое имеем мы, несмотря на то, что временное течение процессов для всего мира может быть и неодносторонним»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Сб. «Философия науки», М.—Пг., 1923, стр. 177—178.

Больцман хотел ограничить понятие термодинамического равновесия с в е р х у, т. е. не допустить, чтобы это понятие было распространено на слишком большую область — Вселенную, какой мы ее наблюдаем. Ограничение понятия термодинамического равновесия с н и з у очевидно: в случае нескольких молекул нельзя говорить о состоянии равновесия системы, а для систем, небольших по числу степеней свободы, равновесие может нарушаться. И вот Больцман делает очень простой ход, он рассматривает в е р х н и й предел масштабов известного нам мира в качестве н и ж н е г о предела более высокого по порядку статистического ансамбля — бесконечной Вселенной, для которой весь видимый нами звездный мир занимает в пространстве и во времени небольшую область, допускающую флюктуационное отклонение от равновесия.

Такой сдвиг понятия флюктуации в небольшой области — применение его к галактическим областям — позволил впоследствии рассматривать наблюдение флюктуаций с помощью микроскопа в качестве аргумента в пользу флюктуационной теории, относящейся ко Вселенной, охватываемой телескопом.

Нарушение второго. начала термодинамики в системах с небольшим числом степеней свободы прямо вытекало из его статистической природы. Уже Максвелл писал о втором начале, что оно справедливо, если не обращать внимания на отдельные молекулы. Знаменитый демон Максвелла, т. е. существо, которое способно видеть и отбирать отдельные молекулы, мог бы нарушить закон энтропии.

Для небольших областей или же для конечных областей бесконечного мира случай делает то, что Максвелл предоставил своему демону; он вызывает флюктуационные нарушения необратимого перехода к более вероятным состояниям.

Обратимся к вопросу о роли механических понятий и закономерностей механики в статистической физике Больцмана. Существование в электродинамике и термодинамике уравнений, аналогичных механическим, Больцман считает возможным объяснить существованием скрытых движений, лежащих в основе теплоты и электричества.

Скрытые механические движения объясняют понятия, которые кажутся на первый взгляд немеханическими, в

том числе необратимость. Но дело оказывается не так просто. Механическая картина получает свое название от тех ее элементов, которые сами не поддаются каузальному анализу. Наука стремится свести физические процессы к механическим перемещениям не потому, что эти процессы абсолютно ясны, а потому, что они, напротив, не могут быть объяснены. Значит, механическое объяснение представляет собой некоторую относительную границу познания, временную, историческую, в принципе допускающую перенесение на другие рубежи развивающегося знания.

«Когда я говорю, что механические образы могли бы осветить подобные неясности, то этим я не хочу сказать, что простейшие элементы положения и движения материальных точек в пространстве являются чем-то абсолютно объяснимым. Наоборот, объяснить последние элементы нашего познания вообще невозможно, так как объяснить — означает сводить к известному, простейшему и поэтому то, к чему все сводится, остается необъясненным. Поэтому, если бы все объяснялось основными, простейшими понятиями механики, они зато остались бы навеки такими же необъяснимыми, каким для нас является учение об электричестве»<sup>1</sup>.

Это замечание Больцмана очень далеко от ортодоксального механицизма. У Больцмана механическая картина мира включает признание своей относительности, неполноты механического объяснения природы. Нетрудно видеть, что именно собственно физические идеи, понятие необратимости и статистической закономерности были исторической основой такого релятивизирования механицизма.

В принципе Больцман допускает, что немеханические понятия могут играть роль последних предельных элементов картины мира. «Я не хочу спорить о том, что является более ясным — понятие положения в пространстве, или понятие температуры, или электрического заряда — подобный спор был бы беспредметным. Но все же мы сильно выиграли бы в ясности картины, если бы могли посредством представления о движении материальных точек в

---

<sup>1</sup> L. Boltzmann. Wissenschaftl. Abhandlungen. B. II, § 39 Leipzig, 1909.

пространстве, т. е. посредством одного единственного и единого принципа, объяснить не только все явления движения твердых, жидких и газообразных тел, но и теплоты, света, электричества, магнетизма, гравитации. Это было бы яснее, чем употребление для каждой из этих действующих сил целого инвентаря таких совершенно необычных понятий, как температура, электрический заряд, потенциал,— характеризуем ли мы эти необычные понятия как нечто совершенно самостоятельное или только как разрозненные энергетические факторы, постулируемые для каждой формы энергии отдельно»<sup>1</sup>.

Забегая вперед, нужно сказать, что антиметафизическое мировоззрение Больцмана, глубокое понимание относительности механической картины мира позволило мыслительно оценить историческую роль и перспективы электронной теории как возможной основы новой, немеханической картины мироздания. Приведенные строки Больцман заканчивает следующей апологией безграничных перспектив науки, которая может выйти за рамки механического естествознания.

«Если говорить о грядущих столетиях или даже тысячелетиях, то я охотно соглашусь с тем, что было бы слишком смелым надеяться, что современная механическая картина сохранится навеки — даже в своих существеннейших чертах».

Поэтому Больцман считает в принципе возможным найти некоторые более общие уравнения, частным случаем которых были бы уравнения механики. Однако он считает необходимым поднять свой голос против «легкомыслия, которое объявляет старую механическую картину мира преодоленной точкой зрения» без серьезной и однозначной разработки новой немеханической концепции. Такая новая картина должна оперировать не механическими, но столь же четкими, определенными исходными понятиями, как и классическая концепция.

Если стремиться избежать картины материальных точек, то нельзя впоследствии вводить в механику материальные точки, а следовало бы исходить из другого рода единичных сущностей или элементов, чьи свойства были бы описаны так же ясно, как свойства материальных точек»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Там же, § 39.

Далее Больцман говорит, что приведенные строки написаны им за семь лет до опубликования книги. Темпы научного прогресса в эти годы были настолько быстрыми, что отдаленные перспективы механической картины мира реализовались в течение нескольких лет. «Я преднамеренно опубликовал все это без изменений,— пишет Больцман,— то, чего я ожидал через столетия или даже тысячелетия, наполовину свершилось в течение семи лет». Речь идет об электронной теории. Больцман пишет о ней, заостряя свои выводы против энергетики и позитивизма. Действительно, немеханическое объяснение природы основано на дальнейшем развитии науки, опрокидывающей агностицизм каждым своим поступательным шагом, развивающим и модифицирующим, а не отрицающим старые идеи, которые были недостаточно точным приближением к объективной истине.

«Но луч надежды на немеханическое объяснение природы исходил не от энергетики, не от феноменологии, а от атомной теории, увлекательные гипотезы которой так же превосходят старую атомную теорию, как ее элементарные образы по своей малости превосходят старые атомы. Излишне говорить о том, что я имею в виду современную электронную теорию. Она, конечно, не стремится объяснить понятие массы и силы, закон инерции из простейшего, легко понимаемого; ее простейшие основные понятия и законы наверно останутся такими же необъяснимыми, как законы механики для механической картины мира. Но преимущество возможности вывести всю механику из других представлений, все равно необходимых для объяснения электромагнетизма, было бы так же велико, как и обратное — механическое объяснение явлений электромагнетизма. Пусть эта первая возможность удастся и исполнится мое требование, выдвинутое семь лет назад!»<sup>1</sup>.

С точки зрения непрерывного, не останавливающегося на механических моделях роста знаний о движущейся материи Больцман и выступал против позитивизма и агностицизма в физике. Феноменологическая «энергетическая» реакция вырастала в конце XIX в. на почве действительного знания, ломающего феноменологические рамки, проникающего во внутренние причины явлений, в растущей

---

<sup>1</sup> L. Boltzmann. Wissenschaftl. Abhandlungen. B. II, § 39, Leipzig, 1909.

степени соответствующего объективной истине. Идеалистические пустоцветы вообще вырастают «...на живом дереве живого, плодотворного, истинного, могучего, всемогущего, объективного, абсолютного человеческого познания»<sup>1</sup>. В данном случае отрицание реальности материи выросло главным образом из абсолютизации феноменологической термодинамики.

Больцман, выступая против «энергетики», смотрел вперед, а не назад. Он не абсолютизировал старые кинетические представления, он предвидел, что простые механические картины сталкивающихся частиц сменяются более сложными картинами, но вместе с тем заявлял, что антиатомистическая реакция, понятие «движения без материи» и отказ от единой кинетической концепции различных видов энергии — все это может только задержать развитие науки. Называя кинетические модели теории газов «специальными представлениями», Больцман пишет:

«Действительно, если история науки показывает, как часто теоретико-познавательные обобщения оказывались ложными, то не может ли и модное в настоящее время направление, отрицательно относящееся к любым специальным представлениям, так же как и признание качественно различных видов энергии, оказаться шагом назад?»<sup>2</sup>.

Вслед за этим идет яркая антиметафизическая декларация, направленная против всякого предвзятого абсолютизма и догматического ограничения путей науки.

Больцман здесь же отмечает некончателный, приближительный характер кинетических моделей. Эти модели служат лишь механическими аналогиями сложных, быть может, вовсе не механических процессов. Больцман пишет: «...называя представления теории газов механическими аналогиями, мы уже этим ясно показываем, как далеки мы от того, чтобы считать, что эти представления во всех подробностях соответствуют истинным свойствам мельчайших частиц тел»<sup>3</sup>.

В следующей главе этой книги в связи с идеями Максвелла мы подробнее остановимся на методе механических аналогий. Больцман ссылается на электродинамику Максвелла, разбирая вопрос о ценности механических

<sup>1</sup> В. И. Ленин. Философские тетради. М., 1936, стр. 328.

<sup>2</sup> Л. Больцман. Лекции по теории газов. М., 1956, стр. 26.

<sup>3</sup> Там же.

построений и выступая как против абсолютизации кинетических моделей, так и против одностороннего ограничения физической теории понятием энергии и вообще макроскопическими понятиями термодинамики. Идеи Больцмана — взлет антиметафизической мысли, пронизывающей классическую физику XIX в., таившую в себе идейные условия перехода к современной физике.

Мы перейдем сейчас к той более высокой форме принципа необратимости, которую он получил в работах Гиббса, появившихся в последней четверти XIX в. и в самом начале девятисотых годов. Из этих работ наибольшее значение приобрели книги «Метод геометрического представления термодинамических свойств вещества» (1873) и «Элементарные принципы статистической механики, разработанные в связи с рациональным обоснованием термодинамики» (1902). Работы Гиббса по сравнению с работами Больцмана не содержали новых фундаментальных физических принципов в собственном смысле слова. И тем не менее Гиббс оказал величайшее воздействие на развитие физики. С точки зрения, с которой рассматривается в этой книге классическая физика XIX в., судьба и исторический эффект работ Гиббса представляют первостепенный интерес. Гиббс, как и Больцман, связал обратимые процессы — поведение дискретных частиц — с термодинамическими состояниями макроскопических объектов; он рассматривал последние как статистические ансамбли — системы с большим числом степеней свободы и вводил в механику таких систем понятия и соотношения теории вероятностей, включая понятие макроскопически необратимого перехода к более вероятным состояниям. Но при построении статистической механики и термодинамики Гиббс пользовался новыми, чрезвычайно эффективными аналитическими и геометрическими методами, которые получили впоследствии новую физическую интерпретацию и вошли в современную квантовую механику.

Среди наследства, полученного неклассической физикой от классической физики мы видим наряду с самими физическими принципами математические приемы и образы, без которых новая физика не могла бы получить свою современную форму. Законы классической физики в собственном смысле, соотношения физических величин, соответствующие классической аппроксимации, независимо

от их математической формы играют в современной релятивистской и квантовой физике различную роль: иногда они связаны с ее основными соотношениями принципом соответствия, иногда они определяют объекты, взаимодействие с которыми позволяет применить классические понятия импульса и координат к квантовым объектам. Но классические физические соотношения, разумеется, не могли быть эвристическим руководством при самом перевороте, поставившем на их место под принудительным давлением результатов эксперимента более общие и точные соотношения. Таким эвристическим фактором часто бывали математические понятия, выросшие на почве классической физики и затем получившие обобщенную форму. Достаточно напомнить, как тензорное исчисление подсказало Эйнштейну новые собственно физические гипотезы в теории тяготения. Поэтому, рассматривая классическую физику как нечто не слишком классическое, как область, в которой подготавливались предпосылки неклассических теорий, мы с особыми интересами вглядываемся в новые, выросшие на классической почве математические понятия.

К числу таких понятий принадлежит фазовое пространство, широко использованное Гиббсом при построении статистической механики и термодинамики.

Можно показать, что понятие фазового пространства, столь важное для современной физики, выросло из классической физики, причем из ее противоречий, двигавших классические понятия вперед, к обобщению и уточнению.

Одно из самых основных (если не самое основное) противоречий классической физики — это противоречие между макроскопической, феноменологической термодинамикой и кинетической теорией. Это противоречие было разрешено Больцманом, который рассматривал термодинамические соотношения, не находившие непосредственного механического объяснения, в качестве статистических аппроксимаций. Это же противоречие в конечном счете привело Гиббса к его физико-геометрическим обобщениям.

В работе «О равновесии гетерогенных веществ» (1875—1878) и в последующих работах Гиббс оперировал весьма продуктивными методами термодинамики, связанными с понятием термодинамических потенциалов. Но он видел,

что сама термодинамика не может найти вид своих функций и должна прибегать к эмпирическим поискам, либо к помощи молекулярно-кинетической теории<sup>1</sup>. Он думает о связи термодинамики и кинетической теории, но решает эту проблему шире, чем Больцман, обобщая ее, выходя за рамки термодинамики, связывая со статистическими закономерностями наиболее общие формулы механики — уравнения движения в форме Гамильтона. При этом он вводит пространство с числом измерений одного порядка с числом молекул в моле, т. е. с числом Авогадро ( $6 \cdot 10^{23}$ ).

В «Основных принципах статистической механики» Гиббс находит статистический аналог термодинамического потенциала (свободной энергии), а затем дифференцированием статистически найденного потенциала вычисляет энтропию, теплоемкость и другие термодинамические величины.

Остановимся подробнее на статистической механике Гиббса и понятии фазового пространства.

Статистическая механика основана на коренном изменении точки зрения при исследовании поведения механических систем. Обычная механика рассматривает состояние некоторой системы в данный момент в его зависимости от состояния той же системы в иной, начальный момент времени. Статистическая механика не интересуется всеми состояниями системы, рассматривает ансамбль систем и стремится установить, как эти системы распределены по различным состояниям и каким образом будет со временем меняться такое распределение.

Гиббс исходит из гамильтоновых уравнений движения системы с  $n$  степенями свободы. Состояние такой системы определяется  $n$  значениями обобщенных координат  $q_1, q_2, \dots, q_n$  и обобщенных импульсов  $p_1, p_2, \dots, p_n$ .

Представим себе большое число систем, тождественных по всем свойствам, кроме конфигураций и скоростей, например множество систем, состоящих из одних и тех же частиц, но различных по положениям и скоростям этих частиц, иначе говоря, по «фазам», которыми обладают в данный момент системы. Теперь предположим, что

---

<sup>1</sup> См. В. К. Семенченко. Джозия Виллард Гиббс, его жизненный путь и основные научные работы. Вступительная статья к книге: Гиббс. Термодинамические работы. М.—Л., 1950.

возможные для этих систем фазы могут быть смежными, т. е. могут отличаться друг от друга бесконечно мало и, сверх того, ими исчерпываются все мыслимые комбинации конфигураций и скоростей. «При этом,— пишет Гиббс,— мы можем поставить себе задачей не проследивать определенную систему через всю последовательность ее конфигураций, а установить, как будет распределено все число систем между различными возможными конфигурациями в любой требуемый момент, если такое распределение было задано для какого-либо момента времени»<sup>1</sup>.

Гиббс рассматривает возможные для рассматриваемых систем фазы как точки некоторого абстрактного, вообще говоря многомерного, пространства. Такое представление не только расширило и сделало более мощным математический аппарат термодинамики и теоретической физики в целом, но и дало толчок другим абстрактным построениям в физике, математической разработке многомерных геометрий и оказало сильное воздействие на характер научного мышления последующего периода.

Чтобы изложить идею введенного Гиббсом абстрактного пространства, вернемся к одной системе и ее состояниям. Если система обладает  $n$  степенями свободы, то  $2n$  чисел  $q_1, \dots, q_n; p_1, \dots, p_n$  можно считать координатами точки в  $2n$ -мерном фазовом пространстве. Состояние системы изображается точкой фазового пространства. Эта точка движется, и движение ее подчинено уравнениям движения. Гиббс рассматривает систему, относительно которой известно не ее определенное состояние в каждый момент времени, а лишь вероятность пребывания в различных состояниях. Переходя к фазовому пространству, где каждому состоянию соответствует точка, можно представить себе, что в нем разлита жидкость, масса которой в каждом объеме фазового пространства равна вероятности того, что система находится в состоянии, изображенном одной из точек, входящих в этот объем фазового пространства. Вероятность пребывания системы в состоянии, изображенном точкой, находящейся по соседству с данной, отнесенная к единице объема фазового пространства, соответствует плотности  $\rho$  указанной жидкости.

---

<sup>1</sup> Дж. В. Гиббс. Основные принципы статистической механики. М.—Л., 1946, стр. 12.

Интеграл плотности  $\rho$  по своему фазовому пространству

$$\int \int \rho dq dp$$

(где  $dq$  — это произведение всех  $dq_i$ , а  $dp$  — произведение всех  $dp_i$ ) равен вероятности того, что система находится в одном из состояний, изображенных точками фазового пространства. Последнее охватывает все возможные состояния, и вероятность того, что система находится в одном из состояний, равна единице. Поэтому можно нормировать  $\rho$  на единицу с помощью условия

$$\int \int \rho dq dp = 1.$$

Исключительно плодотворной оказалась мысль Гиббса о представлении состояний многих систем точками фазового пространства. К этому представлению можно легко подойти с помощью очень простого, почти технического видоизменения предыдущего условия. Введем плотность  $\rho'$ , которая отличается от упомянутой выше плотности  $\rho$  постоянным положительным множителем  $k$ :

$$\rho' = k\rho.$$

В таком случае

$$\int \int \rho' dq dp = k.$$

Теперь можно представить дело таким образом, как будто жидкость с плотностью  $\rho'$  изображает состояния  $k$  одинаковых систем, независимо друг от друга движущихся и переходящих из одних состояний в другие. Совокупность таких систем и называется ансамблем Гиббса. Плотность  $\rho'$  в данной точке в случае такого ансамбля означает вероятное или среднее число систем, находящихся в состояниях, изображенных точками, находящимися по соседству с данной точкой фазового пространства.

В состав ансамбля, входят, вообще говоря, системы, отличающиеся в данный момент по фазе. Пусть фазы систем в данный момент заключены между постоянными зна-

чениями  $p'$  и  $p''$  а также  $q'$  и  $q''$ . Иначе говоря, значения  $p_1, p_2, \dots, p_n$  и  $q_1, q_2, \dots, q_n$  удовлетворяют неравенствам:

$$\begin{array}{l} p'_1 < p_1 < p''_1, & q'_1 < q_1 < q''_1, \\ p'_2 < p_2 < p''_2, & q'_2 < q_2 < q''_2, \\ \dots & \dots \\ p'_n < p_n < p''_n, & q'_n < q_n < q''_n. \end{array}$$

Разности  $p''_i - p'_i$  и  $q''_i - q'_i$  могут быть бесконечно малы и, таким образом, определять бесконечно малый объем фазового пространства  $dp dq$  с фазовой плотностью  $\rho$ . Тогда в предположении непрерывного распределения систем по фазам число систем, имеющих фазы в указанных выше пределах, будет равно  $\int \rho dp dq$  (где, как и раньше,  $dp = (dp_1, dp_2, \dots, dp_n)$ , а  $dq = (dq_1, dq_2, \dots, dq_n)$ ).

В некоторых случаях распределение систем по фазам остается со временем неизменным. Такой случай Гиббс называет статистическим равновесием. В общем случае вероятность пребывания систем в различных состояниях меняется. Законы изменения вероятности и соответственно изменения распределения систем по фазам аналогичны законам движения жидкости. Поэтому весьма плодотворным оказалось представление о «потоке вероятности» и его закономерностях.

Идеи Гиббса и в особенности понятие фазового пространства вошли в современную квантовую механику, в которой конфигурационное и фазовое пространства стали важнейшим методом теоретического исследования атомных и ядерных процессов. В квантовой механике фигурирует понятие плотности  $\rho$  со свойствами, аналогичными свойствам классической плотности, введенной Гиббсом. На первый взгляд в квантовой механике, где нельзя одновременно приписать точные числовые значения координатам  $q$  и импульсам  $p$ , фазовое пространство не имеет смысла. Но, как показал Нейман<sup>1</sup>, и в квантовой механике можно говорить о фазовом пространстве, ансамблях Гиббса и плотности  $\rho$ , определенной для всех моментов времени, если она задана для начального момента.

<sup>1</sup> J. v. Neumann. Mathematischen Grundlagen der Quantummechanik. Berlin, 1932; П. А. М. Д и р а к. Основы квантовой механики, Л.— М., 1937, стр. 149—151.

Вернемся к классической термодинамике.

Идеи Больцмана и Гиббса показали очень важную, быть может самую важную, особенность статистики. Статистика с помощью средних величин связывает макроскопический континуум с микроскопически дискретной средой. Больцман и Гиббс представляют континуальные свойства тел как макроскопическую аппроксимацию свойства статистического ансамбля. Сами по себе идеи Больцмана и Гиббса относятся к механическим свойствам молекул и несводимым к механике свойствам ансамбля, состоящего из очень большого числа молекул. К числу таких свойств принадлежит прежде всего температура — величина, имеющая смысл только для ансамбля. Макроскопическая теория — термодинамика, оперирующая такими немеханическими понятиями, как температура, связана с микроскопическими представлениями кинетической теории газов через понятия средней скорости молекул, средней энергии их движения, вероятности того или иного распределения скоростей и т. д.

Но задачи статистики, вообще говоря, вовсе не ограничены в физике только двумя звеньями, которые статистика связывает с помощью средних величин и вероятностей. Идеи Больцмана и Гиббса связывают себестождественные объекты — молекулы, с одной стороны, и их макроскопические ансамбли, — с другой. За пределами классических теорий статистика может рассматривать и связывать и иные звенья. Представим себе, что вместо механических, обратимых, динамических процессов — движений молекул — фигурируют несводимые к механике микроскопические процессы (например, трансмутации элементарных частиц), а в качестве статистических ансамблей — движения себестождественных частиц (т. е. механические процессы), рассматриваемые как статистический результат (макроскопическая аппроксимация) множества трансмутаций. Тогда статистика получит иную роль по сравнению со статистикой Больцмана и Гиббса. В классической статистике немеханические понятия температуры и энтропии представляют собой макроскопические аппроксимации микроскопических механических понятий импульса и скорости молекул. В квантовой статистике микроскопические немеханические понятия связываются с механической макроскопической аппроксимацией и, таким

образом, сама механика перестает быть абсолютным, единственно объективным субстратом чисто феноменологических немеханических картин, как это было, или, вернее, как к этому стремились в классической физике.

С этой точки зрения следует взглянуть на проблему объективного физического смысла статистических аппроксимаций и вообще фигурирующих в физике математических величин.

Статистическая физика Больцмана и Гиббса могла питать представление о субъективном характере континуальной термодинамики. И, действительно, многие современники Больцмана и Гиббса считали объективной лишь кинетическую картину движущихся молекул и отказывали в объективном характере понятиям температуры и, соответственно, статистическим понятиям средней скорости и средней энергии. Термодинамика представлялась результатом субъективного и произвольного, прагматически целесообразного или неизбежного отказа от наблюдения индивидуальных движений молекул. В этом сказалась унаследованная от XVIII в. субъективная трактовка вероятности, лапласовская идея абсолютной динамической детерминированности, которую Энгельс с полным основанием приравнивал к религиозному фатализму<sup>1</sup>.

В соответствии с этим из статистической термодинамики выросли позитивистские представления. Но меньше всего в этом была виновата сама термодинамика. Всерьез никто из физиков не сомневался в объективном существовании температуры и в объективном характере энтропии, ее возрастания и других статистических закономерностей. Более того, именно термодинамика показала объективный характер статистических понятий и закономерностей. Конечно, понятия температуры, энтропии и т. д. созданы людьми. Но это относится к механическим понятиям. Что же касается факта перехода теплоты от горячего тела к холодному, т. е. перехода распределения скоростей молекул от менее вероятного к более вероятному, то этот факт имел место задолго до заселения Земли людьми и задолго до образования Земли.

Здесь уместно остановиться на важной с эпистемологической и историко-научной стороны проблеме физиче-

---

<sup>1</sup> См. Ф. Энгельс. Дialeктика природы. М., 1955, стр. 172.

ских эквивалентов математических величин. Эта проблема была поставлена в очень ясной форме Максвеллом в 1871 г., и мы коснемся ее подробнее в следующей главе. Здесь отметим только, что основная идея Фарадея и Максвелла — идея реальности поля — была логически и исторически связана с мыслью о существовании физических эквивалентов некоторых сравнительно сложных векторно-аналитических величин. Идя по следам Фарадея, Максвелл предположил, что дивергенция и вихрь имеют определенные физические прообразы и не сводятся к чисто математическим, условным понятиям, подлежащим устранению из окончательных, сопоставимых с физическим экспериментом, результатов вычислений. Однако мысли Максвелла, изложенные в работе 1871 г. о физической классификации математических величин, были частью более широкой идейной тенденции в трактовке проблемы физических эквивалентов математических величин.

Выше, во второй главе, говорилось о физической трактовке интегралов дифференциальных уравнений движения. Они получили определенный физический смысл в механике Лагранжа, Гамильтона и Якоби.

Развитие второго начала термодинамики на основе кинетической теории газов можно рассматривать также в качестве поисков физических эквивалентов математических величин. На этот раз речь идет о статистически средних величинах, математических ожиданиях и вероятностях. Эти величины получили в работах Больцмана и Гиббса вполне определенный физический смысл. Больцман сопоставил энтропию вероятности состояния ансамбля. Гиббс построил механику, в которой основные понятия имеют статистический характер — механику статистических ансамблей. Для Гиббса, как и для Больцмана, статистический ансамбль — это не субъективный результат произвольного игнорирования индивидуального поведения отдельных молекул, а объективно существующая реальность.

Идеи Гиббса, позволившие найти физический смысл ряда статистических понятий и величин, по-новому осветили проблему бесконечности. Гиббс все время оперирует величинами, неограниченно растущими либо становящимися неопределенно большими, и все время находит предельные соотношения между такими величинами. Неодно-

значные, неопределенные соотношения между микроскопическими процессами становятся при переходе к неопределенно большому (статистически репрезентативным) макроскопическим масштабам однозначными и определенными. В свою очередь при переходе от неопределенно больших статистических ансамблей к микроскопическим масштабам некоторые соотношения становятся неоднозначными и неопределенными (микроскопические флуктуации).

Эти переходы от неопределенных соотношений между определенными микроскопическими величинами к определенным соотношениям между неопределенно большими макроскопическими ансамблями и обратно несколько аналогичны анализу бесконечно малых. Неопределенные соотношения между переменными (например, отношение пройденного пути ко времени — скорости) приобретает определенный характер при переходе к бесконечно малым областям. В статистической физике бесконечно малые — это статистически нерепрезентативные пространственно-временные величины, определяющие по своему порядку области статистических флуктуаций. Бесконечно большие масштабы характеризуются практически непреложным соответствием экспериментально наблюдаемых величин их математическим ожиданиям. Космическая флуктуация Больцмана разыгрывается с этой точки зрения в бесконечно малой области Вселенной.

Такое представление о бесконечности несколько приближается к лейбницевой версии исчисления бесконечно малых. Как известно, Лейбниц считал песчинку по отношению к горе прообразом бесконечно малой величины. Впоследствии такая версия уступила место более строгим и последовательным — по преимуществу континуальным — идеям в обосновании анализа. Но статистическая физика и статистическая механика вводят объективные критерии, чтобы различать порядки величин в природе. Флуктуации как свойство микроскопических объектов и второе начало термодинамики как макроскопическая закономерность служат такими критериями.

И в этом смысле, как и в других, классическая статистика исторически и логически подготавливала неклассическую физику. В макроскопической теории развитие релятивистских концепций привело к идее физической геометрии

рии, т. е. экспериментального решения вопроса, какая именно геометрия — Эвклида, Римана (в узком смысле положительной кривизны) либо Лобачевского — соответствует рассматриваемой области мира. В квантовой теории выбор между коммутативной и некоммутативной алгеброй, как и многие другие математические вопросы, решается на основе эксперимента. Но исторической предпосылкой такого подхода к математическим понятиям было длительное развитие классической физики. Уже в механике существовали физические прообразы величин, которые по своей малости не фигурируют в некоторой задаче. Таково, например, гравитационное поле Луны в задаче двух тел — задача о вращении Земли вокруг Солнца. Но только в физике, именно в молекулярной, статистической физике XIX в., узнали о физических прообразах пренебрегаемых закономерностей. Пренебрегаемое поле Луны не отличается по своему характеру от поля Земли и Солнца. Но пренебрегаемые в макрофизике необратимых процессов динамические закономерности имеют иную природу, иной характер, чем статистические закономерности поведения больших ансамблей. Интерпретация энтропии как логарифма вероятности состояния статистического ансамбля, связавшая микрофизику обратимых процессов с макрофизикой необратимых процессов, явилась основой разграничения «сфер истинности» динамических и статистических законов. В классической механике действуют лишь динамические закономерности. В молекулярной физике (а с точки зрения квантовой теории и в атомной физике) действуют статистические закономерности. Идея различных и при этом переходящих друг в друга закономерностей была выражением эмансипации физики от механики. Обобщение такой эмансипации — учение о несводимых друг к другу формах движения, содержащееся в «Диалектике природы», естественно, предугадывало во многих отношениях более общую физическую теорию, в которой сама механика дискретных частиц рассматривается в общем случае как выражение статистических закономерностей.

Нельзя представлять дело таким образом, будто неклассическая физика распространила на новый ряд явлений принцип несводимости, найденный классической физикой. Прежде всего следует подчеркнуть, что такого общего

принципа классическая физика не знала. Она знала о несводимости статистических закономерностей, управляющих молекулярными ансамблями, к механическим закономерностям, управляющим взаимодействиями и поведением отдельных молекул. Она, таким образом, пришла к разграничению макро- и микромира. Она пользовалась макроскопическими понятиями, теряющими смысл, если их применить к отдельным молекулам, — прежде всего понятием температуры. Простое распространение подобного соотношения на другие звенья иерархии дискретных частей вещества еще не приводит к неклассическим идеям, и последние вовсе не укладываются в классическое соотношение между макро- и микромиром. Они укладываются в философскую концепцию несводимости, которая выросла в середине XIX в. не только из классической физики, но и из обобщения всей науки и всей практики человечества. Но это философское обобщение не могло привести само по себе к неклассическим идеям, да и никогда не претендовало на априорное выведение собственно физических концепций. Такие претензии были свойственны априорной натурфилософии, полностью ставшей достоянием истории после появления материалистической диалектики Маркса и Энгельса. Учение о несводимости сложных закономерностей движения к более простым отказывается не только от тождественных закономерностей, независимых от масштабов данной области мира, но и от неизменных соотношений между различными закономерностями, управляющими включенными друг в друга частями Вселенной.

Соотношение между закономерностями микроскопических областей, включающих небольшое число молекул, и закономерностями макроскопических ансамблей раскрыто статистикой Максвелла, Больцмана и Гиббса. Можно представить себе (это и имелось в виду, когда речь шла о простом обобщении классической физики), что такое же статистическое соотношение сохранится, если мы продолжим иерархию «молекула — макроскопическое тело» в обе стороны. Тогда возникает представление о космическом газе, состоящем из небесных тел и подчиненном больцмановой статистике. Далее, можно представить себе газ, состоящий из галактик, и так до бесконечности. С другой стороны, можно допустить, что элементарные частицы

подчиняются той же статистике, что и молекулы, можно далее представить элементарную частицу как статистический ансамбль и таким образом прийти к статистическому варианту брюсовского:

«Быть может, эти электроны —  
Миры, где пять материков,  
Искусства, знания, войны, троны  
И память сорока веков...»

А ригорі нельзя ответить ни утвердительно, ни отрицательно на вопрос о распространении больцман-гиббсовской статистики на ультракосмос и ультрамикросмос. Релятивистская космология, рассматривая «мир как целое» (т. е. часть Вселенной, для которой межгалактические расстояния являются макроскопически малыми), не пришла к сколько-нибудь законченным представлениям. Что же касается элементарных частиц, то твердо установлено, что они подчиняются иной статистике по сравнению со статистикой Больцмана — Гиббса.

В квантовой механике, вообще говоря, непрерывно меняется вероятность определенных, дискретных значений динамических переменных, так же как в классической статистической термодинамике непрерывно меняются средние значения плотности, температуры и т. д. Но в классической статистике за статистическими закономерностями поведения статистических ансамблей и непрерывного распределения средних величин стоят динамические закономерности поведения дискретных частиц. В квантовой механике за кулисами статистических законов, определяющими непрерывное распределение вероятностей, нельзя найти простые динамические закономерности. Сами частицы в своем движении (в предельных случаях — в значениях скоростей либо положений, в общем случае — того и другого) подчиняются статистическим законам. В квантовой механике непрерывно распределены и непрерывным образом изменяются вероятности пребывания частиц. В релятивистской квантовой механике такая картина становится четырехмерной: не только пространственное распределение частиц определено статистически, но и длительность существования частицы во времени определяется как обратная мера вероятности некоторой трансмутации, прекращающей ее существование.

Из такого характера квантовой статистики вытекает иное, неклассическое представление о тождественности и нетождественности частиц и, соответственно, иные меры вероятности различных состояний.

У Больцмана вероятность распределения состояний между молекулами (вообще между индивидуумами) зависит от числа способов («комплексий»), которыми распределение может быть осуществлено. Перестановка частиц означала новую комплексию, так как частица, перемещаясь, сохраняет свою индивидуальность, непрерывность траектории позволяет идентифицировать частицу. В квантовой механике уже нет такого критерия себестождественности частицы: мы не можем считать переместившуюся частицу той же самой частицей. Поэтому пространственная перестановка частиц не может приводить к новой комплексии. Бозе в 1924 г. создал статистику, в которой распределения равновероятны независимо от числа комплексий. Ферми и Дирак в 1926 г. построили другую статистику, исходящую из изменения знака волновой функции при перестановке частиц.

Обратим теперь внимание на зависимость распределения вероятности состояний системы от ее энергии. Это позволит связать характеристику понятия энергии и характеристику исторической роли этого понятия (эмансипировавшего физику от механики) со статистическими закономерностями. Такая связь может быть представлена в очень ясной форме, если пользоваться указанными выше понятиями статистической механики.

Представим себе некоторое множество смежных, т. е. бесконечно мало отличающихся состояний и изображающих их точек, занимающих некоторую область фазового пространства. Изменение каждого состояния с течением времени, происходящее в согласии с уравнениями движения системы, изображается перемещением точки фазового пространства. Через известное время сместится вся взятая нами фазовая область. Одна из фундаментальных посылок статистической механики — теорема Лиувилля — утверждает, что объем такой области не изменится, хотя форма ее может измениться.

Неизменность объема смещенной фазовой области служит исходным нунктом важных, собственно физических выводов. Их можно яснее представить, если рассматривать

большую, макроскопическую (т. е. обладающую практически неисчислимыми степенями свободы) систему, не взаимодействующую с другими телами, и малую по сравнению с ней, но тоже макроскопическую систему, уже не замкнутую, но испытывающую бесчисленные воздействия со стороны тел, входящих в большую систему. Меньшую систему называют подсистемной. Рассмотрим, как распределится вероятность пребывания системы между различными состояниями<sup>1</sup>.

Можно показать, что воздействия, испытываемые макроскопической подсистемой извне, малы по сравнению с внутренним взаимодействием входящих в нее молекул. Поэтому при достаточно больших размерах подсистему рассматривают как квазизамкнутую. Поэтому энергию большой системы можно считать приближенно равной сумме энергий частей системы, не принимая во внимание энергии их взаимодействия. Это обстоятельство имеют в виду, когда называют энергию системы аддитивной величиной.

Вернемся теперь к плотности вероятности, т. е. к функции  $\rho$  координат  $p$  и  $q$  фазового пространства. Этой функции соответствует число систем, находящихся в состояниях, изображенных точками, входящими в единицу объема фазового пространства, или, короче, плотности вероятности  $\rho$  соответствует число фазовых точек в единице объема. Это число не изменится с течением времени, когда состояния систем изменятся и изображающие эти состояния точки перейдут в другую область фазового пространства. Не изменится согласно теореме Лиувилля и объем области. Значит, стационарной оказывается и функция распределения — плотность вероятности. При движении вдоль фазовых линий (т. е. линий, по которым движутся с течением времени фазовые точки) плотность вероятности  $\rho$  сохраняется. Следовательно  $\rho$  зависит от такой функции координат и импульсов, которая не меняется при движении. Чтобы еще ближе подойти к определению этих величин, обратим внимание на отмеченный выше квазизамкнутый характер подсистем. Пусть две подсистемы обладают функциями распределения (плотностями вероятности)  $\rho_1$

---

<sup>1</sup> См. Л. Ландау и Е. Лифшиц. Статистическая физика. М.—Л., 1940, стр. 15—31.

и  $\rho_2$ . Так как состояния подсистем независимы, а вероятность одновременного появления независимых состояний равна произведению их вероятностей, мы можем сказать, что плотность вероятности  $\rho_{12}$  для системы, состоящей из двух подсистем, равна произведению их плотностей вероятности

$$\rho_{12} = \rho_1 \rho_2$$

и, соответственно, логарифм функции распределяется

$$\ln \rho_{12} = \ln \rho_1 + \ln \rho_2$$

— аддитивная величина. Ее сохранение и аддитивность означают, что поведение системы (в смысле вероятности ее состояний, т. е. распределения вероятности по различным состояниям) определяется значениями аддитивных, сохраняющихся при движении величин. Таковы энергия, импульс и момент импульса. В областях фазового пространства, в которых энергия, импульс и момент импульса имеют заданные значения, плотность вероятности  $\rho$  постоянна и вероятность пребывания системы в этих областях пропорциональна их объему. Таким образом определяется функция распределения замкнутой системы. Указанное распределение Гиббс назвал *микрoкaнoническим*.

Здесь мы подходим к очень важному пункту учения об энергии. Статистическое поведение системы определяется энергией, импульсом и моментом. Импульс связан с поступательным движением тела как целого. Момент импульса — с его вращением. Рассмотрим тело в системе отсчета, в которой оно не движется как целое. Тогда статистическое состояние тела в заданных внешних условиях и при заданном движении полностью определяется его энергией. Такая роль энергии в решении задачи статистического распределения бросает свет на вопросы, поставленные в предыдущей главе. Изложенные в ней идеи получают дальнейшую конкретизацию. Мы видели, что энергия — понятие, специфическое для физики, эмансипирующейся от механики. Зависящий только от энергии тела процесс изменения состояний тела (рассматриваемого в пространственной системе отсчета, относительно которой оно как целое покоится), этот процесс, макроскопически

соответствующий изменению лишь вдоль временной оси отсчета, подчиняется статистическим закономерностям. Еще раз выявляется связь сформулированного Энгельсом и полностью раскрытого физикой XX в. понятия энергии с понятием энтропии.

Отсюда вытекает значение понятия энергии для описания поведения статистических ансамблей. Состояние ансамбля — макроскопического тела может быть определено (при заданных внешних условиях и заданном движении тела как целого) энергией. Метафизическим абсолютизированием такой возможности была концепция Оствальда, выступившего против микроскопически-кинетического аспекта в учении о теплоте. Как известно, Оствальд возвел феноменологическую макроскопическую картину, в которой неразличимы координаты и скорости молекул, в ранг единственной физической реальности. Но все дальнейшее развитие учения о теплоте и в особенности работы, посвященные второму началу термодинамики, показали бесплодность оствальдовской концепции. Оно вместе с тем показало глубину и плодотворность идей Больцмана, столкнувшего микроскопическую теорию, описывающую перемещения молекул, с макроскопической аппроксимацией, в которой фигурирует состояние системы, зависящее только от ее энергии и не зависящее от собственно механических величин — импульса и момента импульса системы в целом и положений и скоростей входящих в нее молекул. Это столкновение приняло форму противоречия между обратимостью одних и необратимостью других процессов в природе. Развитие физики в XX в. показало, что только учет реального противоречия между обратимостью одних и необратимостью других процессов может раскрыть действительные закономерности термодинамики. Если ограничиться феноменологической картиной, придать ей абсолютный характер, забыть об условности и ограниченной законности макроскопического изучения поведения систем, то неизбежно придешь к неправильным выводам. Без учета другой, микроскопической, кинетической стороны дела нельзя увидеть границы применимости второго начала термодинамики. В этом состоит один из существенных итогов дискуссии об аксиоматическом обосновании второго начала термодинамики, происходившей в первой четверти нашего столетия.

В XX столетии классическая теория энтропии обогатилась одним новым фундаментальным, собственно физическим принципом, а затем вступила в полосу попыток аксиоматизации с помощью очень сложных абстрактно-математических построений.

В 1906 г. Нернст сформулировал новый, независимый от первого и второго начала принцип термодинамики. Его иногда называют третьим началом термодинамики. Он вводит в термодинамику некоторые абсолютные значения, в частности абсолютное значение энтропии. Второе начало термодинамики указывает на существование и изменение энтропии  $S$ , определяемой через дифференциал  $dS$ . Поэтому энтропия определена с точностью до постоянной интегрирования. Этого достаточно, чтобы решать задачи, в которые входят изменения энтропии. Но существуют задачи, требующие знания абсолютного значения энтропии.

Путь, которым шел Нернст, можно представить следующим образом (мы несколько модернизируем этот путь, имея в виду последующие работы Планка). Энтропия системы может быть представлена в виде интеграла:

$$S = \int \frac{dQ}{T} + S_0,$$

где  $Q$  — количество тепла, которое система получила или потеряла в течение рассматриваемого процесса,  $T$  — абсолютная температура, а  $S_0$  — постоянная интегрирования, не зависящая от температуры.

В результате изучения процессов, происходящих при очень низких температурах, Нернст обнаружил, что при температурах, близких к абсолютному нулю, изменения энтропии становятся очень малыми. Нернст предположил, что энтропия стремится к неизменному значению  $S_0$ , когда температура стремится к абсолютному нулю. Это значение не зависит от параметров и состояния системы. Константу  $S_0$  можно рассматривать как нулевое значение энтропии. Предположение Нернста было подтверждено и получило широкое применение; из третьего начала термодинамики были сделаны такие выводы, как стремление теплоемкости к нулю, когда температура стремится к абсолютному нулю, недостижимость температуры абсолютного нуля (при принципиальной возможности получить

любое приближение к абсолютному нулю) и многие другие.

Рассмотрим теперь уже не физические принципы классического учения об энтропии и необратимости процессов природы, а математические основы этого учения и попытки его аксиоматизации. Эти попытки, охватывающие первую четверть нашего столетия, начались собственно еще на исходе девяностых годов. В 1898 г. Н. Н. Шиллер попытался вывести существование и возрастание энтропии из математических соотношений, характеризующих обратимые и необратимые процессы теплообмена<sup>1</sup>. В основе такой попытки лежит математическая характеристика абсолютной температуры как интегрирующего делителя выражений количества тепла. Какие допущения необходимы, чтобы абсолютная температура играла роль интегрирующего делителя, позволяющего представить энтропию в виде функции состояния? Шиллер предлагает на выбор один из следующих постулатов:

I. Изменение одной только температуры данного тела может произойти не иначе, как лишь за счет подведенного к телу тепла.

II. Для данного тела нельзя подобрать такой обратимый круговой процесс изменений параметров, независимых от температуры, при помощи которого достигалось бы непрерывное повышение или понижение температуры тела.

III. При всяком обратимом адиабатном изменении состояния тела, характеризуемом с помощью  $n$  независимых друг от друга параметров, любой из вышеупомянутых параметров возвращается к своему первоначальному значению, коль скоро остальные  $n - 1$  параметров возвращаются к своим. То есть: при упомянутом процессе каждый из параметров может быть определен через другие».

Шиллер говорит, что каждый из этих постулатов эквивалентен невозможности некомпенсированного перехода тепла от холодного тела к горячему (постулат Клаузиуса) и невозможности вечного двигателя второго рода (постулат Томсона). В качестве основного варианта Шиллер рассматривает третью формулировку — однозначную опреде-

---

<sup>1</sup> Н. Н. Ш и л л е р. О втором законе термодинамики и об одной новой его формулировке. «Изв. Киевск. ун-та», 1898.

ленность каждого параметра через другие при обратимом адиабатическом изменении состояния тела. Когда  $n - 1$  параметров  $x_2, x_3, \dots, x_n$  возвращаются к первоначальным значениям, температура  $x_1 = T$  также возвращается к первоначальному значению. Значит, температура не зависит от промежуточных значений, от предшествующей истории, а целиком определяется состоянием тела. «Это требование, — пишет Шиллер, — выполняется прежде всего тогда, когда приращение температуры не будет зависеть от промежуточных значений параметров состояния, т. е. прежде всего, когда любая из температур адиабатного процесса определится только в функции соответствующих параметров... — А это обстоятельство, очевидно, соответствует тому условию, чтобы уравнение... имело интеграл». Здесь имеется в виду уравнение адиабатического процесса. Если принять постулат Шиллера, выражение обратимого теплообмена должно иметь интегрирующий делитель. Поэтому Шиллер считал свой постулат исходным постулатом аксиоматического выведения второго начала термодинамики.

В первой четверти XX в. появился ряд сходных по существу, но значительно более разработанных с математической стороны попыток аксиоматизации учения об энтропии. Эти попытки были связаны, в частности, с геометрическим представлением математических соотношений, характеризующих обратимые и необратимые циклы. Понятия интегрирующего делителя и другие не упоминавшиеся здесь математические понятия получили более строгую и плодотворную форму, и это позволило раскрыть некоторые собственно физические соотношения, до того бывшие неявными.

В 1909 г. Каратеодори<sup>1</sup> выдвинул новое обоснование второго начала термодинамики. Он хотел обойтись без гипотетических кинетических представлений и ограничиться наблюдаемыми величинами — объемом и давлением, а также химическим составом тел. Величины, исключенные в теории Каратеодори, вообще говоря, также наблюдаемы и измеримы, но об их измерении и его результатах можно говорить, вводя дополнительные представления, выходя-

---

<sup>1</sup> Math. Ann., 67, 1909. Теория Каратеодори в весьма ясной форме изложена Максом Борном в книге «Natural Philosophy of Cause and Chance», Oxford, 1949.

щие за рамки макроскопической феноменологической термодинамики.

«Можно поставить вопрос, — пишет Каратеодори, — каким образом должна быть построена феноменологическая термодинамика, чтобы при расчетах использовать лишь непосредственно измеримые величины, т. е. объем, давление и химический состав тела?»<sup>1</sup>.

Речь, таким образом, идет о непосредственно измеримых термодинамических в собственном смысле величинах. Можно ли вывести второе начало термодинамики, точнее говоря, его первое утверждение — существование энтропии, оперируя такими собственно термодинамическими, или, по выражению Каратеодори, феноменологическими величинами и понятиями. Каратеодори решил такую задачу в крайне абстрактной и математически изящной форме. Изящество ее состоит в сравнительно небольшом числе и, соответственно, общности исходных посылок. С физической стороны исходные допущения сводятся к следующему. Рассматривается система из двух жидкостей. Они разделены перегородкой. Перегородка может рассматриваться по мере надобности то как теплопроницаемая, то как теплонепроницаемая. В этой системе могут быть достигнуты некоторые состояния в результате адиабатического обратимого процесса. Но каждое такое адиабатически достижимое состояние предполагает, что в окрестностях существуют другие состояния, которые не могут возникнуть в результате обратимого процесса. Эти состояния в соседстве адиабатически достижимого состояния если и могут быть достигнуты, то лишь в результате необратимых процессов. Постулат неизбежных адиабатически недостижимых состояний в окрестностях адиабатически достижимого — единственный исходный постулат Каратеодори. Из него математически выводится первое утверждение второго начала термодинамики — существование энтропии как функции состояния.

Несмотря на все изящество теории Каратеодори, несмотря на ее математическую корректность и физическую безукоризненность (отсутствие гипотез, выходящих за

---

<sup>1</sup> Sitzungsber. d. Preuss. Akad., 33, 3, 1919. Цит. по А. Зоммерфельду. Термодинамика и статистическая физика. М., 1955, стр. 57—58.

рамки феноменологической термодинамики), указанная теория подверглась ряду критических замечаний. Планк, Зоммерфельд и некоторые другие физики указывали, что в этой теории понятие температуры теряет непосредственный физический смысл. Речь идет не только о температуре. В теории Каратеодори нет термодинамических, феноменологических понятий, связывающих термодинамику с кинетической теорией, а между тем при бесспорном различии термодинамики и кинетической теории тепла именно их связь дает наибольший эвристический эффект и позволяет указать границы физической содержательности термодинамической теории. Физическая содержательность, сохранение физического смысла принимает вид статистической репрезентативности. Математически безукоризненная теория имеет физический смысл, если сохраняется некоторый порядок величин. С такой точки зрения, разработанной Больцманом применительно ко второму началу термодинамики, кинетическое представление — и только оно — позволяет определить границы применимости феноменологически континуализированного термодинамического представления.

Для небольшого числа молекул первое начало термодинамики сохраняет свой смысл, а второе — нет: флуктуации не дают возможности осуществиться циклу, подчиняющемуся второму началу термодинамики. С точки зрения теории Каратеодори система, состоящая из небольшого числа молекул, не может быть исключена без дополнительных допущений.

Каратеодори видел, что преимущества его теории в части обоснования второго начала термодинамики связаны с меньшей (по сравнению с не столь абстрактными концепциями) эвристической ценностью, т. е. с ограниченными возможностями в части применения второго начала. Продолжая цитированные выше замечания, Каратеодори пишет, что теория, исходящая из непосредственно измеримых величин, неоспорима и математически совершенна; но мало дает исследователю. Она исходит из минимального числа гипотез. «Однако именно это преимущество делает ее мало пригодной с точки зрения исследователя не только потому, что в ней температура появляется в качестве производной величины, но прежде всего потому, что гладкие стены искусственно воздвигнутых в этой теории

зданий не позволяют установить какую либо связь между миром видимой и осязаемой материи и миром атома»<sup>1</sup>.

Из критических замечаний по поводу теории Каратеодори мы остановимся на замечаниях Планка, которые послужили отправным пунктом иной по сравнению с Каратеодори попытки выведения второго начала термодинамики из минимального числа постулатов.

В статье «Об основании второго закона термодинамики»<sup>2</sup> Планк сравнивает обоснование закона энтропии у Клаузиуса и В. Томсона (круговые процессы для идеальных газов) и у Каратеодори (существование вблизи всякого состояния системы смежных состояний, недостижимых адиабатическим путем). Понятия абсолютной температуры и энтропии, как заметил еще Гельмгольц в 1884 г.<sup>3</sup>, могут быть определены из формального соотношения: среди всех интегрирующих делителей дифференциала количества тепла абсолютная температура зависит только от отнесенной к любому термометру температуры. Отсюда — возможность аксиоматического определения некоторой величины, оказывающейся после ряда математических построений энтропией.

Но аксиоматическое определение абсолютной температуры и энтропии и выведение второго начала термодинамики не удовлетворяют Планка. Вопрос стоит не о выборе между априорно-логическим и экспериментально-эмпирическим обоснованием принципа энтропии. Любая математическая абстракция, из которой выведено второе начало термодинамики, в последнем счете отображает результаты эксперимента. Если физика не хочет потерять связь с природой, она должна, по словам Планка, либо выводить исходные принципы непосредственно из эксперимента, либо сравнивать с экспериментом выводы из исходного принципа. С точки зрения первого метода — непосредственного вывода принципа из эксперимента — обоснование второго начала термодинамики у Томсона имеет

<sup>1</sup> Sitzungsber. d. Preuss. Akad., 33, 3, 1919.

<sup>2</sup> Sitzungsber. d. Preuss. Akad., 31, 453, 1926. Русский перевод статьи приложен к русскому изданию книги: В а п - д е р В а а л ь с и К о н с т а м м. Курс термостатики, т. I, М., 1936, стр. 438—452. Содержание этой статьи изложено Планком во Введении в теоретическую физику, ч. 5. Теория теплоты, § 36—47. М.—Л., 1935, стр. 43—54.

<sup>3</sup> Berl. Ber. (1884); Ges. Abhadlg., В 3, 121, 1885.

явное преимущество. Анализ кругового процесса приводит ко второму началу термодинамики на основе многократно проверенной, совершенно достоверной, подтвержденной бесчисленными экспериментами невозможности определенных процессов. Напротив, невозможность достичь соседних состояний адиабатическим процессом не была непосредственно проверена экспериментом: «...никто еще не ставил опытов с целью достижения всех смежных состояний какого-либо определенного состояния адиабатическим путем»<sup>1</sup>. Здесь соответствие с данными эксперимента достигается вторым путем — сопоставлением с этими данными частных выводов из исходной формулировки Каратеодори: «...у нас еще остается в распоряжении второй способ, причем в данном случае имеются многочисленные экспериментальные подтверждения отдельных следствий второго закона, которые вытекают из принципа Каратеодори точно так же, как из принципа Томсона»<sup>2</sup>.

Забегая вперед, отметим, что вряд ли можно сводить связь идей Каратеодори и аксиоматизации второго начала вообще с экспериментом, к экспериментальному а *posteriori* подтверждению частных выводов, выведенных а *priori* из этих идей. Невозможность адиабатического перехода к смежному состоянию, разумеется, обобщает некоторые данные эксперимента, возводя их в ранг универсальной абстракции. Но и принцип Томсона абстрактным образом универсализирует выводы, сделанные при конструировании лишь некоторых тепловых машин.

Более важными являются, на наш взгляд, дальнейшие соображения Планка о сравнительной ценности обоснований второго начала термодинамики. Планк говорит о статистическом характере второго начала, допускающего флюктуационные отклонения тем больше, чем меньше число степеней свободы, которым обладает система. Обоснование Томсона — невозможность использования одного теплового резервуара — явно неприменимо к системе тел, обладающих небольшим числом механических степеней свободы, «...так как в случае подобной системы, например, в случае газа, состоящего из десяти молекул, невозможно провести различия ни между термической и механической

---

<sup>1</sup> М. Планк. Введение в теоретическую физику, ч. 5, § 36.

<sup>2</sup> Там же.

энергией, ни между высшей и низшей температурой»<sup>1</sup>. Неприменимость томсоновского принципа к такой системе означает, конечно, отсутствие противоречия между этим принципом и микроскопическими закономерностями.

Иное дело — принцип Каратеодори. Он не является явной макроскопической аппроксимацией и именно поэтому может вступить в противоречие с принципом, согласно которому в изолированной системе всякое возможное (в смысле сохранения энергии) состояние достигается с течением времени с любым приближением. Поэтому принцип Каратеодори нуждается в ограничениях и, с другой стороны, — в дополнительных допущениях, указывающих, как отличить достижимые смежные состояния от недостижимых.

Трудно все же согласиться с Планком и считать указанное им различие между принципами Томсона и Каратеодори столь радикальным. Оба принципа требуют ограничительных и дополнительных указаний. В томсоновском обосновании второго начала в явной форме фигурирует макроскопическое понятие температуры. Ограниченность этого понятия, неприменимость его к небольшим ансамблям вовсе не заключена в нем самом, вовсе не свойственна термодинамике. Понятие температуры оказывается ограничено-макроскопическим только при переходе от феноменологической термодинамики к кинетической теории газов, вернее, — при необходимом дополнении феноменологических термодинамических соотношений кинетическими. Утверждение — «не может быть построена машина, использующая один тепловой резервуар для получения механической работы», — основанное на опытном изучении двигателей, оказывается ограничено-макроскопическим только при попытке связать его с механикой. Такая связь отыскивается в области микроскопических масштабов, в механике молекулярных движений. Само понятие макроскопической ограниченности появляется в момент, когда сталкиваются между собой феноменологическая термодинамика и кинетическая теория и когда это столкновение раскрывает статистический смысл принципа необратимости.

---

<sup>1</sup> М. П л а н к. Введение в теоретическую физику, ч. 5, § 36.

Такая логическая характеристика томсоновского обоснования второго начала соответствует и историческому развитию термодинамики, и кинетической теории. Понятие вероятности, без которого не может быть выявлена ни связь между термодинамикой и кинетической теорией, ни их противоречие, т. е. макроскопическая ограниченность термодинамики,— это понятие вошло в физику после Томсона. Ретроспективно, с позиций, достигнутых Максвеллом, Больцманом и Гиббсом, в принципе Карно можно увидеть идеи, ограничивающие необратимость макроскопическими масштабами. Но исторически ни у Карно, ни у Томсона, ни у Клаузиуса не могло быть понятия макроскопической ограниченности, основанного на статистической интерпретации необратимости, на понятиях вероятности и флуктуациях.

С этой точки зрения нужно оценивать и принцип Каратеодори. Планк сталкивает его с квазиэргодической гипотезой, с утверждением, что в изолированной системе может быть с любым приближением достигнуто всякое возможное с точки зрения сохранения энергии состояние. Планк требует далее дополнительных указаний на признаки, отличающие достижимые смежные состояния от недостижимых. Но отсюда следует лишь возможность дальнейшего развития идей Каратеодори. Они, как мы увидим дальше, и получили такое развитие в работах Эренфеста и Афанасьевой-Эренфест.

Всякое обоснование принципа необратимости, исходящее из макроскопических закономерностей и опирающееся на результаты макроскопического эксперимента, приведет к характеристике границ необратимости, если оно включает понятие вероятности. Планк дает свое обоснование второго начала термодинамики, весьма глубокое и изящное, отождествляя для необратимых процессов понятия *д о с т и ж и м о г о* состояния и *б о л е е* *в е р о я т н о г о* состояния, а для обратимых процессов предполагая равную вероятность состояний. Тем самым указаны границы необратимости. Очень продуктивным и изящным представляется сравнение состояний системы, отличающихся только в отношении одного входящего в систему тела, затем в отношении двух тел и т. д.

Разбирая концепцию Каратеодори и излагая иные идеи обоснования принципа необратимости, Планк

возвращается к своим взглядам, высказанным на пятьдесят лет раньше в работе о втором начале термодинамики<sup>1</sup>. Он развивает их в упомянутой статье «Об основании второго закона термодинамики» и в соответствующем разделе курса теоретической физики<sup>2</sup>.

Как было сказано, всякое обоснование второго начала, указывающее границы его физического смысла, опирается на статистическое разрешение конфликта между термодинамикой и кинетической теорией. Концепция Оствальда и других представителей феноменологической метафизики, отвергающих кинетические представления, сводит второе начало к констатации «обесценения» энергии. «Ценность» энергии согласно такому определению состоит в возможности перейти из одной формы в другую. Механическая энергия полностью переходит в теплоту, а теплота в механическую энергию — лишь частично, в обязательном сопровождении компенсирующего процесса, увеличивающего равномерность распределения тепла. Но такое представление о втором начале термодинамики не охватывает, по словам Планка, самую сущность дела. Можно представить себе полное превращение тепла в работу. Планк доказывает этот тезис следующим построением. Некоторый газ расширяется и совершает работу, но температура его не падает, так как к газу подводится тепло из некоторого резервуара, более горячего, чем газ. Температура и энергия газа неизменны. Значит энергия, получаемая из горячего резервуара, целиком идет на механическую работу, совершаемую газом при расширении. Никаких других превращений энергии нет. Следовательно, тепловая энергия может быть полностью превращена в механическую работу без компенсирующего изменения распределения температур.

Поэтому Планк выдвигает другое обоснование второго начала термодинамики. Он подчеркивает, что никакое «доказательство» этого начала в смысле выведения из более общих принципов — невозможно. «Доказательство» начала — его выведение из наиболее простых, общих и достоверных экспериментальных данных. Достоверное, эмпирически доказанное положение — невозможность периоди-

---

<sup>1</sup> M. Planck. Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. München, 1879.

<sup>2</sup> См. примеч. 2 на стр. 216.

чески действующей машины, поднимающей груз за счет охлаждения некоторого теплового резервуара. Такая машина (вечный двигатель второго рода) отличается от машины, производящей работу из ничего (вечный двигатель первого рода), существование которой несовместимо с законом сохранения энергии. Если бы мы располагали машиной, производящей работу за счет одного теплового резервуара, можно было бы использовать неисчерпаемые ресурсы тепловой энергии независимо от существования температурных перепадов. Невозможность вечного двигателя первого рода означает не только несотворимость, но и неуничтожаемость движения. Невозможность вечного двигателя второго рода не обладает такой обратимостью: вполне возможна машина, повышающая температуру теплового резервуара за счет механической работы. В каждом случае трения происходит повышение температуры за счет механической работы. Чтобы компенсировать такие, связанные с трением, превращения работы в тепло, нужно было бы превратить тепло в работу и таким образом восстановить прежнее положение. Возьмем в качестве примера аппарат, которым пользовался Джоуль, чтобы установить механический эквивалент тепла. В этом аппарате падение груза нагревало воду в сосуде. Можно ли за счет охлаждения этой воды поднять груз на прежнюю высоту так, чтобы все вернулось к прежнему положению? Такой обратный процесс, восстанавливающий в мире исходное положение, и был бы осуществлением вечного двигателя второго рода. Поэтому невозможность подобной машины можно выразить как невозможность полностью обратить процесс, сопровождающийся трением. Необратимость процессов, сопровождающихся трением и вообще переходом механической работы в тепло, эквивалентна невозможности вечного двигателя второго рода. Следует подчеркнуть, что под обратимостью здесь подразумевается не только возможность превращения в прежнее состояние тел, участвующих в рассматриваемом процессе. Такое возвращение в принципе всегда достижимо. Требуется, чтобы при этом вся природа вернулась в прежнее состояние. Если обратное течение рассматриваемого процесса невозможно без соответствующих изменений состояния других тел, не участвующих непосредственно в рассматриваемом процессе, мы назовем такой процесс необратимым.

Необратимость процесса определяется большей вероятностью конечного состояния по сравнению с начальным. Планк говорит о «термодинамической вероятности», или «термодинамическом (в отличие от механического) весе». Смысл этих выражений выясняется из следующих соображений.

Планк рассматривает два состояния системы  $Z$  и  $Z'$  и анализирует процессы перехода из состояния  $Z$  в состояние  $Z'$  и обратно при условии, что вне системы в природе не остается никаких изменений после возвращения системы в состояние  $Z$ . Это условие, очевидно, отпадает, если система включает все тела природы. Переходы  $Z \rightleftharpoons Z'$  возможны, если состояния обладают равной вероятностью; если вероятность  $Z'$  больше вероятности  $Z$ , то возможен лишь переход  $Z \rightarrow Z'$ ; если же вероятность  $Z$  больше вероятности  $Z'$ , то возможен только переход  $Z' \rightarrow Z$ .

Теперь представим себе, что состояния Вселенной  $Z$  и  $Z'$  отличаются друг от друга только состоянием одного тела. Все остальные тела природы не меняют своих состояний при переходах  $Z \rightleftharpoons Z'$ . Пусть рассматриваемое тело физически однородно: макроскопически мельчайшие частицы не отличаются друг от друга. Состояние тела определяется его объемом и температурой. Пусть в состоянии  $Z$  его объем будет  $V$  и температура —  $\Theta$ , а в состоянии  $Z'$  соответственно —  $V'$  и  $\Theta'$ . Пусть далее, энергия тела равна  $U$  в состоянии  $Z$  и  $U'$  в состоянии  $Z'$ . Эти энергии могут быть, вообще говоря, различными и закон сохранения энергии будет при этом соблюдаться благодаря существованию в системе некоторого груза  $G$ , который меняет высоту ( $h$  в состоянии  $Z$  и  $h'$  в состоянии  $Z'$ ) так, чтобы компенсировать разницу между  $U'$  и  $U$ :

$$G(h - h') = U' - U.$$

Планк рассматривает переход тела из состояния  $Z$  в состояние  $Z'$ , предполагая, что этот переход — обратимый и происходит адиабатически. Согласно первому началу термодинамики, в этом случае

$$dU + pdV = 0.$$

Здесь выражение в левой части не является полным дифференциалом. Планк превращает его в полный диффе-

ренциал, разделив на «интегрирующий знаменатель»  $N$  — функцию температуры  $T$  и объема  $V$ , и получает дифференциал некоторой новой функции  $S$  этих независимых переменных:

$$\frac{dU + pdV}{N} = dS.$$

Очевидно,  $S$  — функция состояния тела. Планк предлагает назвать  $S$  энтропией и рассматривать написанную только что формулу как определение энтропии. Определение это еще не однозначно: величина  $dS$  становится полным дифференциалом при многих значениях  $N$ . Припяв условие  $N > 0$ , Планк продолжает доказательство. В случае обратимых адиабатических переходов  $Z \rightarrow Z'$   $dS$  — частное от деления  $dU + pdV$  на  $N$  — равно нулю, а энтропия  $S$  представляет собой постоянную величину.

Предположим теперь, что при переходе  $Z \rightarrow Z'$  объем  $V$  изменился и принял значение  $V'$ , а энергия тела  $U$  перешла в  $U^*$ . Соответственно, груз  $G$  компенсирующий изменения энергии, перешел с уровня  $h$  на уровень  $h^*$ . Это потребовало затраты или же привело к освобождению энергии в зависимости от того, какой из уровней выше. Величины со звездочкой ( $U^*$  и  $h^*$ ) отличаются, вообще говоря, от величин со штрихом ( $U'$  и  $h'$ ). В частном случае, когда  $U^* = U'$  и  $h^* = h'$ , тело достигает состояния  $Z'$ . Оно, очевидно, может перейти и из состояния  $Z'$  в  $Z$ . Перед нами обратимый переход: состояния  $Z$  и  $Z'$  — равновероятны.

В случае  $U^* < U'$ , т. е. когда энергия тела при переходе из состояния  $Z$  в состояние  $Z'$  не достигает энергии  $U'$ , переход  $Z \rightarrow Z'$  уже не будет обратимым. Состояние  $Z'$  может быть достигнуто, если рассматриваемое тело (сохраняющее постоянный объем  $V$ ) нагревается за счет трения при падении груза с уровня  $h^*$  (он в этом случае выше) до уровня  $h'$ . Но образование тепла за счет трения необратимо; значит в этом случае переход  $Z \rightarrow Z'$  — необратимый переход, т. е. состояние  $Z'$  обладает большей вероятностью, чем состояние  $Z$ .

Наконец, рассмотрим случай  $U^* > U'$ , иначе говоря случай, когда энергия достигнутая при переходе, больше энергии  $U'$  состояния  $Z'$ . Соответственно, компенсирующий изменение энергии груз  $G$  должен был в этом случае ока-

заться на уровне меньшем, чем  $h'$ . Такой переход позволил бы осуществить вечный двигатель второго рода и, как показывает опыт, невозможен; мы должны, следовательно, приписать состоянию  $Z'$  меньшую вероятность, чем состоянию  $Z$ .

Перечислив эти три случая, Планк рассматривает поведение энтропии  $S$  в каждом из них. Если объем  $V$  не меняется, т. е.  $dV=0$ , из выражения для  $dS$  при условии  $N > 0$  следует, что энтропия изменяется так же, как энергия. При объеме  $V'$  и энергии  $U^*$  энтропия будет сохранять свое первоначальное значение  $S$ , так как при обратимо-адиабатическом процессе  $S = \text{const}$ . При том же объеме  $V$  и энергии  $U'$  энтропия достигла значения  $S'$ , изменившись так же, как энергия, т. е.  $S - S'$  имеет тот же знак, что и  $U^* - U'$ . В первом из рассмотренных случаев энтропия не изменилась во втором выросла, в третьем уменьшилась.

Дальнейшие рассуждения Планка посвящены определению интегрирующего делителя  $N$ . Он определяется, как некоторая функция  $T$  температуры  $t$ , причем разность значений  $T$  при  $t=100$  и  $t=0$  равна 100. Это условие и свойство  $T$  превращать  $dU + pdV$  при делении на  $T$  в полный дифференциал составляют определение  $T$ . Определенная таким образом величина  $T$  называется абсолютной температурой.

Дополняя аксиоматическое определение энтропии, Планк приходит к выводу, что «...всякий происходящий в природе процесс протекает в таком направлении, что сумма энтропий всех участвующих в процессе тел увеличивается. В предельном случае — для обратимого процесса — эта сумма остается неизменной. Или короче: энтропия является мерой вероятности»<sup>1</sup>.

При всей глубине концепции Планка исходным пунктом дальнейших попыток аксиоматизации второго начала были идеи Каратеодори. Дальнейшие попытки показали логическую независимость двух утверждений, составляющих второе начало: утверждения о существовании энтропии и утверждения о ее возрастании. В 1928 г. Т. А. Афа-

---

<sup>1</sup> М. Планк. Об основании второго закона термодинамики. В книге Ван-дер Ваальс и Констамм. Курс термостатики, т. 1. М., 1936, стр. 452.

насьева-Эренфест<sup>1</sup> сделала крупный шаг в аксиоматизации второго начала, исходя из такого разграничения утверждения о существовании интегрирующего множителя для выражения  $dQ$  и утверждения о неуклонном возрастании энтропии в реальных адиабатических процессах. Далее Афанасьева-Эренфест ввела строгие определения обратимого и необратимого процессов, количества тепла, адиабатического процесса, адиабатически изолированной системы и некоторых других понятий.

Афанасьева-Эренфест заменяет термин *о б р а т и м ы й* процесс термином *к в а з и с т а т и ч е с к и й* (термин Каратеодори) или *к в а з и п р о ц е с с* (термин Афанасьевой), а процесс, обычно называемый *н е о б р а т и м ы м*, она называет *н е с т а т и ч е с к и м*, так как его необратимость является проблемой, подлежащей исследованию. Если система переходит из одного состояния в другое так медленно, что мы можем оба состояния считать состояниями равновесия, то такой переход и будет квазистатическим. Равновесие определяется значениями некоторых «параметров состояния»  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Квазистатический процесс состоит из бесконечно малых переходов от состояния, определяемого параметрами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , к состоянию, определяемому параметрами  $x_1 + dx_1, x_2 + dx_2, \dots, x_n + dx_n$ . Реальные процессы нестатические — это последовательности неравновесных состояний.

Количество тепла  $dQ$ , получаемое системой и равное сумме бесконечно малого изменения  $dU$  внутренней энергии системы и работы  $dA$ , совершаемой системой под внешними системами, определяется начальными значениями параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и их изменениями  $dx_1, dx_2, \dots, dx_n$ . Если обозначить через  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  функции параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , определяемые структурой системы, то можно написать:

$$dQ = Y_1 dx_1 + Y_2 dx_2 + \dots + Y_n dx_n.$$

Планк не останавливается на проблеме существования интегрирующего делителя  $T$ . Он вычисляет выражение  $dQ/T$  для идеального газа, показывает, что оно является полным дифференциалом, и затем переходит от идеального газа к другим системам. Планка интересует возрастание

<sup>1</sup> «Журн. прикл. физики», 5, 3—4, 3, 1928.

энтропии; в этом для него основное содержание второго начала термодинамики. Афанасьева-Эренфест доказывает, что существование интегрирующего делителя представляет собой особую проблему, независимую от необратимости изменений энтропии. В свою очередь возрастание энтропии не может быть выведено из ее существования, т. е. из существования интегрирующего делителя для выражения  $dQ$  через  $dx_1, dx_2, \dots, dx_n$ .

Разграничивая две стороны проблемы, Афанасьева-Эренфест развивает само представление о необратимости. Она вводит понятия элементарной необратимости и необратимости второго рода. Элементарная необратимость — это необратимость реальных, нестатических процессов. Но она не совпадает с самим понятием нестатичности и выводится из двух аксиом: одной, запрещающей обратимость нестатического процесса, и другой, определяющей его направление. Необратимость второго рода выводится из свойств квазистатического процесса и соответствующих аксиом. От нее зависит существование энтропии. Возрастание же последней зависит от элементарной необратимости, определяющей однообразие реальных процессов.

Исторические корни серии математических и физических исследований первой четверти XX в., направленных на аксиоматизацию второго начала термодинамики, не сводятся к внутренним запросам термодинамики, кинетической теории газов и статистической механики. Разумеется, возросшее разнообразие и вместе с тем общность термодинамических задач требовали упорядочения основ учения об энтропии. Но эти требования далеко не определяли направления и темпа исследований в области обоснования второго начала термодинамики. Направление и темп во многом зависели от общего развития математических методов и физических идей в начале столетия. Тенденция аксиоматизации второго начала термодинамики была частью общей тенденции, охватившей физику и математику. Корни этой общей тенденции в свою очередь не сводились к внутренним силам развития, к возрастанию числа все более разнообразных задач и все более общих методов их решения во всех областях науки. Несомненно, интерес к аксиоматизации отражал революцию в учении о пространстве, времени и движении, вызванную теорией отно-

сительности. Физические корни математических методов аксиоматизации придали последней специфическую окраску, которой не было в работах прошлого века, стремившихся аксиоматизировать физику. В XIX в. под аксиоматизацией обычно понимали формулировку априорных понятий и соотношений, из которых якобы можно было вывести все содержание физики. Подобная априорная аксиоматизация была унаследована от XVIII в., давшего такой образец априорной аксиоматизации физики, как «Метафизические основания естествознания» Канта.

В XIX в. уже появилось представление об аксиомах (их стали теперь чаще называть постулатами), применимых в границах, которые можно определить экспериментом. В течение всей второй половины XIX столетия такое представление оставалось неопределенной догадкой. В девятидесятые годы и еще более во втором десятилетии XX в. положение изменилось. Общая теория относительности показала, что исходные геометрические постулаты, лежащие в основе физики, применимы в ограниченных областях и критерием их применимости оказались данные о гравитационных полях — результаты астрономических наблюдений и физических экспериментов. Так появилась физическая геометрия. Работы Гильберта и Неттер позволили вывести законы сохранения из постулатов однородности и изотропности пространства и времени и из еще более абстрактных понятий инвариантности лагранжиана в отношении тех или иных групп преобразований. Но сами эти абстрактные геометрические и аналитические соотношения оказались абстрактным отображением собственно физических закономерностей. Критерием «существования» служила уже не столько непротиворечивость математических соотношений, сколько их физическая применимость, и в науке появилось сначала *implicite*, а потом и явно новое, физическое понятие «существования».

Наука XIX в. дала ряд глубоких и изящных построений в области абстрактных, в частности многомерных, геометрий и в других областях математики — построений, до поры до времени не находивших применения в физике. В XX в. они приобрели физическую интерпретацию, и вместе с тем идеи аксиоматизации в геометрии и вообще в математике приблизились к физике, в значительной мере потеряв свою априорную категоричность.

Аксиоматизация второго начала термодинамики оспаривалась на развитие абстрактных геометрий. Выше, излагая физические идеи Каратеодори и Афанасьевой-Эренфест, мы не касались этой стороны дела. Она была весьма существенной. Необратимость процессов теплообмена может быть представлена в виде требования, чтобы линии адиабат не пересекались, вообще в виде определенных геометрических допущений. Если представить необратимость в виде таких геометрических соотношений, то термодинамика может использовать результаты, полученные при разработке абстрактных геометрий. Напомним, что сама эта разработка исторически была связана с применением геометрических образов в физике XIX в., в частности с идеями Гиббса, положившего начало широкой геометризации классической термодинамики.

Каратеодори, Планк, Эренфест, Афанасьева-Эренфест и другие физики, пользовавшиеся в первые три десятилетия XX в. геометрическими образами для аксиоматизации второго начала термодинамики, значительно обобщили и расширили понятия необратимости и энтропии. Но еще большее обобщение и расширение этих понятий произошло в середине XX в. под влиянием новых запросов науки и практики. Весь столетний путь учения об энтропии от Сади Карно до двадцатых годов нашего века был последовательным осмыслением и обобщением наблюдений, сделанных при изучении тепловых двигателей. Как ни далеко уходили от них в математических построениях и физических гипотезах о космосе, физическим эквивалентом уравнений были процессы перехода тепла от теплового резервуара к двигателю, затем к конденсатору и т. д. Математические понятия, в особенности многомерные абстрактно-геометрические образы, позволили создать очень общую надстройку над этим эмпирическим фундаментом. Теперь наступило время, когда можно было расширить самый фундамент.

Если в первой четверти нашего столетия сравнительно быстро развивалась аксиоматизация второго начала термодинамики, то для тридцатых и сороковых годов характерно появление физических и математических идей, связанных с значительным обобщением второго начала. Перечисленные выше попытки аксиоматизации были направлены на получение минимального числа наиболее общих непроти-

воречивых постулатов, объясняющих необратимый переход тепла от более нагретого тела к менее нагретому, необходимость компенсирующего процесса в случае подобного перехода, невозможность вечного двигателя второго рода. Теперь очередные общие проблемы термодинамики состояли в применении понятия равновесия ко Вселенной как целому, в обобщении понятия энтропии для всех процессов, при которых неопределенность событий, заданных своими вероятностями, переходит в достоверность в результате испытаний, в создании термодинамики необратимых процессов как общей теории реальных (происходящих с конечной скоростью) процессов в природе.

Рассмотрим эти проблемы.

Термодинамика Вселенной как целого, развившаяся в тридцатые — сороковые годы, преемственно связана с флуктуационно-космической теорией Больцмана, но исходит из релятивистской космологии, созданной работами Эйнштейна (1917), А. А. Фридмана (1922) и рядом других работ, появившихся в двадцатые годы. В тридцатые годы, анализируя проблемы необратимости и понятие энтропии применительно к расширяющейся или пульсирующей Вселенной, Толмен пришел к выводу о направленной, необратимой и вместе с тем бесконечной эволюции мира как целого. Энтропия мира возрастает неограниченно. Ее монотонное возрастание не приводит к состоянию равновесия. Понятия такого состояния и, соответственно, максимальной энтропии, неприменимы ко Вселенной в целом.

В течение двадцати с лишним лет релятивистская термодинамика не пришла в этой области к общепризнанным однозначным результатам. Был высказан ряд новых неопровержимых аргументов против идеи тепловой смерти. Но названная идея давно уже стала достоянием истории. Что же касается идеи теплового равновесия бесконечной Вселенной (эта идея, разумеется, не совпадает с идеей тепловой смерти), то к аргументам Толмена прибавился ряд новых; однако проблема еще не получила окончательного решения.

Вселенная Больцмана в целом не только может достичь теплового равновесия, но уже и достигла его, и это отнюдь не привело к тепловой смерти в силу гигантских флуктуаций, нарушающих равновесие в сверхгалактиче-

ских масштабах. Но бесконечная Вселенная, какой ее рисует теория Больцмана, не претерпевает монотонной необратимой эволюции. Бесконечная Вселенная не знает тепловой смерти потому, что она в целом не знает «тепловой жизни», не знает процессов перераспределения тепла, переходов от одного макроскопического состояния к другому. Неуравновешенные, «живые» в этом смысле, части Вселенной могут охватывать множества галактик, но они исчезающе малы по сравнению со Вселенной и «жизнь» во Вселенной — это рябь на поверхности неподвижного океана. Может ли этот океан обладать течением, направленным в одну сторону, т. е. рассматриваться как бесконечно широкая река? Существует ли космический эквивалент понятия необратимого времени? Теория Больцмана не исключала, но и не рассматривала такую возможность. Бесконечным фоном локальных флуктуаций — развивающихся необратимых процессов, сопровождающихся возрастанием энтропии, и предшествующих им обратных процессов — служит уравновешенная в целом Вселенная. Гигантские межгалактические флуктуации так же мало могут нарушить ее равновесие, как флуктуации, вызывающие броуновское движение.

Релятивистская термодинамика, рассматривая Вселенную в целом, может исходить из различных предположений о ее конечности, ограниченности и замкнутости в пространстве и во времени. В этих вопросах космология не пошла дальше самых предварительных концепций. Если рассматривать Вселенную в целом как бесконечную (это значит, что любую часть Вселенной можно считать исчезающе малой по сравнению с некоторой другой большей частью), то, как полагает ряд современных исследователей, понятие статистического равновесия вообще не может быть применено ко Вселенной. Такой взгляд не является сейчас общепризнанным; существуют попытки вернуться в общем к концепции Больцмана и найти новые аргументы в пользу возможности флуктуаций<sup>1</sup>.

Применимость понятия статистического равновесия к бесконечной Вселенной может быть оспариваема на основе собственно статистических соображений. Тем самым вводится верхний предел применимости статистической

---

<sup>1</sup> См. Я. П. Терлецкий. ЖЭТФ, 22, 4, 506, 1952.

термодинамики (существование нижнего предела, неприменимость статистики к системам с небольшим числом степеней свободы, например к «десяти молекулам» Планка, — очевидно). И. Р. Плоткин<sup>1</sup> утверждает, что система, состоящая из бесконечного числа частиц, не может находиться в состоянии равновесия и, соответственно, теряет смысл понятие флуктуаций, отнесенных к бесконечной системе, как к их статистическому фону. Макроскопические состояния системы из бесконечного числа частиц равновероятны, и нельзя поэтому говорить о мере вероятности состояний (энтропии) такой системы и о возрастании вероятности. Эти соображения станут более понятными, если предварительно разъяснить некоторые математические термины, относящиеся к теории множеств. Этими терминами обозначаются соотношения между множествами, причем такие соотношения изменяются при переходе от конечных множеств к бесконечным. Неожиданные выводы теории множеств (например, вывод об «одинаковом числе» точек в квадрате и в отрезке), принадлежащие к числу величайших открытий науки конца XIX в., не только поражали математиков своей смелостью и изяществом, но вселяли уверенность в грядущей возможности их применения к физическим проблемам. Физика XIX в., столь смело оперировавшая бесконечностями, давала со своей стороны поводы для такой уверенности.

Если между множествами  $A$  и  $B$  можно установить взаимнооднозначное соответствие (т. е. сопоставить каждому элементу множества  $A$  некоторый элемент множества  $B$  и наоборот, не встретив при этом некоторых элементов без пары), то  $A$  и  $B$  считают множествами одной и той же мощности, иначе говоря, множествами с «одинаковым количеством» элементов. Если множество  $A$  находится во взаимнооднозначном соответствии с множеством натуральных чисел  $1, 2, 3, \dots$ , то  $A$  называют счетным множеством. Как это ни странно, множество всех рациональных чисел — счетно, его можно доставить во взаимнооднозначное соответствие с натуральным рядом. Но множество всех чисел или множество всех точек на отрезке прямой несчетно. Оно, как говорят, имеет мощность континуума. Мощностью континуума обладает

---

<sup>1</sup> ЖЭТФ, 11, 20, 1950.

множество точек любого интервала  $a < x < b$ , всей числовой прямой —  $-\infty < x < +\infty$ , любого квадрата.

Теперь вернемся к статистической физике. Возьмем бесконечное — не большое в статистическом смысле, а именно бесконечное — число состояний. Эти состояния образуют бесконечное счетное множество состояний. Пусть, с другой стороны, множество частиц — также бесконечное счетное множество. Тогда будет бесконечным и число состояний, характеризуемых числами заполнения  $n_1, n_2, \dots$  (распределение частиц по состояниям). Каждому распределению частиц по состояниям, т. е. каждой системе заданных чисел заполнения  $n_1, n_2, \dots$ , соответствует множество состояний, имеющее мощность континуума. Если различным распределениям соответствуют множества, то теряет смысл различие этих распределений в смысле различной вероятности. Вместе с тем падают основания для необратимого перехода от менее вероятных распределений к более вероятным, т. е. для понятия термодинамического равновесия, к которому приходит Вселенная.

Таким образом, невозможность термодинамического равновесия бесконечной Вселенной выводится из несчетности множества микросостояний. К. П. Станюкович выводит указанную невозможность из некоторых собственно физических допущений. Он утверждает, что множество точек фазового пространства, соответствующих неравновесным состояниям и находящихся на любых расстояниях от точки, соответствующей состоянию абсолютного равновесия, была бы счетным множеством, если бы бесконечная Вселенная состояла из частиц одного класса. В такой Вселенной взаимодействия между частицами образуют счетное множество. В результате взаимодействий Вселенная переходит из одного состояния в другое. Следовательно, бесконечное счетное множество состояний должно быть исчерпано бесконечным счетным множеством взаимодействий. Известно, что такая задача разрешима в течение бесконечного (в актуальном смысле) интервала времени. Но в действительности Вселенная содержит частицы различных классов; поэтому состояния системы бесконечного числа частиц образуют множество мощности континуума, которое не может быть исчерпано даже бесконечным счетным множеством взаимодей-

ствий. Пусть во Вселенной находится счетное множество классов различных «частиц», т. е. дискретных частей материи: элементарных частиц, молекул, звезд, звездных ассоциаций. Иерархия «частиц» бесконечна, а множество ее ступеней, очевидным образом, — счетное множество. Здесь мы подходим к наиболее существенному с физической стороны пункту излагаемой концепции. Взаимодействия между «частицами» приводят к образованию «частиц» тех же, а также новых классов, и к их распадам. При таком предположении множество возможных микросостояний бесконечной Вселенной представляется несчетным; оно обладает мощностью континуума и не может быть исчерпано даже бесконечным счетным числом макроскопических состояний. Поэтому при возрастании энтропии каждой конечной области Вселенной, Вселенная в целом не стремится к состоянию равновесия.

Оценка изложенных взглядов выходит за рамки исторического повествования. Для историка правильность или неправильность физических идей — исходный пункт, а в данном случае попытки решения вопроса приводят к новым концепциям, даже к чему-то, напоминающему «ливень» возрастающих по числу новых концепций. Тем не менее можно указать на общую тенденцию, которую изложенные идеи иллюстрируют независимо от своей дальнейшей судьбы.

Четверть века назад новые идеи в термодинамике, связанные с релятивистской космологией, исходили из моделей конечной, либо бесконечной, в пространстве, или во времени, или в пространстве и времени, стационарной либо нестационарной Вселенной. Последующее развитие указанных идей до настоящего времени включительно не может выйти из круга гипотетических, предварительных и неоднозначных ответов на вопрос о бесконечности и стационарности Вселенной. Вместе с тем появились некоторые новые исходные пункты развития термодинамики Вселенной. До последнего времени проблема бесконечности Вселенной рассматривалась в термодинамике как проблема экстенсивной бесконечности. Сейчас выясняется важность проблемы интенсивной бесконечности. Вопрос о счетности или несчетности множества состояний решается в связи с вопросом о взаимодействиях частиц, о дискретности пространства и времени, дискретности действия. Видимо, он

не может быть решен без учета неопределенности сопряженных переменных, т. е. вне квантовой механики. Более того, современная термодинамика рассматривает взаимодействия, приводящие к порождению и аннигиляции частиц, в том числе элементарных. Если попытаться экстраполировать наметившуюся тенденцию, мы видим в перспективе включение в проблему необратимой эволюции Вселенной выводов релятивистской квантовой теории.

Общая теория относительности, сохранив в неприкосновенности основные утверждения термодинамики, значительно изменила относительное значение и соподчиненность этих утверждений — структуру термодинамики. Прежде всего она привела к четкому представлению о законах термодинамического равновесия как о термостатике — частной области термодинамики в истинном смысле, т. е. науки о действительных, необратимых физических процессах<sup>1</sup>. После работ Фурье (1822), Навье (1822), и Пуассона (1825), посвященных теплопроводности и движению вязких жидкостей, работ, как это теперь видно, приведших к решению частных проблем термодинамики необратимых процессов, наступил период преимущественно изучения состояний равновесия и обратимых процессов. Но обратимые процессы в термодинамике по существу не являются процессами, они протекают с бесконечно малой скоростью. Впрочем, даже эти фиктивно-динамические проблемы были заслонены методом термодинамических потенциалов. Работы, посвященные реальным термодинамическим процессам, происходящим с конечными скоростями, шли вне этого главного фарватера термодинамики. В них до последнего времени не фигурировало понятие энтропии<sup>2</sup>.

Положение изменилось благодаря таким важным сдвигам в технике, как применение термодиффузии в газах и растворах для разделения изотопов и развитие реактивной техники. Наряду с этим действовали «иманентные» силы развития физики — попытки перестройки термодинамики на основе специальной, а затем и общей теории относи-

---

<sup>1</sup> См. констатацию этой важной историко-физической тенденции в предисловии В. К. Семенченко к русскому переводу книги К. Денбига. Термодинамика стационарных необратимых процессов. М., 1954, стр. 3—9.

<sup>2</sup> См. В. К. Семенченко. Там же, стр. 3—4.

тельности<sup>1</sup>, а также распространение и обобщение термодинамических понятий, относящихся к равновесию и обратимым процессам, на смежные области физики. Термостатика постепенно распространила свою власть на учение об электричестве и магнетизме; электростатика и магнетостатика стали применять обобщенные, применимые к физике в целом понятия и методы термостатики. Аналогичным образом должна была существовать обобщенная термодинамика в широком смысле, общая теория необратимых физических процессов, подчиняющая себе электродинамику и другие отрасли физики, рассматривающие различные реальные процессы, происходящие с конечной скоростью.

Быстрое развитие термодинамики необратимых процессов, отвечавшей на указанные внутренние запросы теоретической физики, стимулировалось запросами техники. Именно последние определили время и формы перелома в развитии термодинамики и появление ряда исследований, посвященных общей динамике физических процессов. Они появились в тридцатые и главным образом в сороковые годы<sup>2</sup>.

Технические задачи и научные проблемы, связанные с разделением изотопов, и другие задачи и проблемы, характерные для середины нашего столетия, послужили в последнем счете импульсом для обобщения идеи необратимости и усиленной разработки термодинамики как общей (охватывающей электродинамику и другие отрасли физики) теории реальных необратимых физических процессов.

В такой теории принцип необратимости не совпадает с идеей максимума энтропии: мы можем представить себе Вселенную с необратимым возрастанием энтропии, но без перспективы теплового равновесия. Но сам по себе принцип необратимости не ограничен «сверху», т. е. при переходе к метагалактике и Вселенной в целом. «Снизу» же, т. е. в микромире, необратимость наталкивается на предел, который не поколеблен теорией относительности. Элементарные движения отдельных частиц и систем, включающие небольшое число частиц, представляют собой обратимые процессы.

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 4 и 7.

<sup>2</sup> L. Onsager, Phys. Rev., 37, 405, 1931; 38, 2265, 1931; C. Eckart, Phys. Rev., 58, 267, 919, 1940; I. Meixner, Zs. f. phys. chem. (B) 235, 1943; Ann. d. Phys., 49, 244, 1943 и др.

С этой стороны релятивистская физика сохранила исходную посылку классической физики — картину обратимых перемещений отдельных частиц, лежащих в основе макроскопической необратимости. Эта исходная посылка оказалась проблематичной в квантовой и еще более в релятивистской квантовой теории.

Квантовая механика изменила учение об энтропии, позволив определить энтропию как безразмерную величину и соответственно определить ее однозначным образом<sup>1</sup>. Принципиальное значение имели уже упомянутые квантовые статистики, учитывавшие неразличимость частиц и, следовательно, ставившие под сомнение себестоимость каждой частицы при ее перемещении. Однако в нерелятивистской квантовой механике пересмотр этой наиболее общей классической идеи только начался. Квантовая механика лишь ограничивала соотношением неточностей идею себестоимости частицы с непрерывной мировой линией (т. е. с определенным положением и скоростью в каждой мировой точке). Но начало было положено, и в дальнейшем релятивистская квантовая теория (включая попытки ее обобщения) вплотную подвела науку к статистическому представлению о существовании и движении частицы и, соответственно, к обобщению понятия необратимости. Уже нерелятивистская квантовая механика ввела понятие статистической закономерности применительно к отдельному объекту. В релятивистской квантовой механике и в квантовой электродинамике выросли предпосылки для более радикального пересмотра понятия себестоимости частицы, перемещающейся в пространстве обратимым образом. Можно представить себе, как об этом уже говорилось во введении и во второй главе этой книги, движение частицы в виде статистического результата трансмутационных процессов в клетках пространства-времени, образующих мировую линию частицы. Тогда действие оказывается пропорциональным числу таких клеток — мерой вероятности мировой линии, и принцип наименьшего действия становится принципом наибольшей вероятности, как это предполагал когда-то Эддингтон. В этом случае основной принцип механики обратимых процессов стал бы род-

---

<sup>1</sup> Л. Ландау и Е. Лифшиц. Статистическая физика. 2-е изд. М.—Л., 1940, стр. 25—26; А. С. Компанец. Теоретическая физика. М., 1955, стр. 453—454.

ственным принципу возрастания энтропии, и можно было бы говорить об универсальности статистико-вероятностной необратимости физических процессов. Быть может, на-встречу указанным, пока еще крайне неясным тенденциям идут новые математические идеи, вводящие энтропию в число основных понятий теории вероятностей.

В сороковые годы XX в. кибернетика — одно из самых важных направлений технической революции середины столетия — вызвала к жизни теорию информации. Развитие этой теории привело к разработке нового, более общего учения об энтропии в теории вероятностей. Сошлемся на работу Шеннона «Математическая теория сообщений»<sup>1</sup> и работу А. Я. Хинчина «Понятие энтропии в теории вероятностей»<sup>2</sup>, которой мы и будем следовать в дальнейшем изложении вопроса<sup>3</sup>.

Представим себе группу событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , одно — и только одно — из которых наступает при каждом испытании. Такая группа называется *полной системой событий*. Если взять обычные для теории вероятностей примеры, то полной системой событий  $A_1, A_2$ , ( $n = 2$ , т. е. простая альтернатива) будет выпадение той или иной стороны монеты при бросании ее, а полной системой событий  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$  будет выпадение 1, 2, 3, 4, 5 или 6 при бросании игральной кости. Представим себе далее, что вероятности событий  $A_1, \dots, A_n$ , обозначаемые через  $p_1, \dots, p_n$ , вообще говоря неравные, заданы вместе с событиями. Все эти вероятности положительны, либо равны нулю и нормированы на единицу:

$$p_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

В этом случае нам задана *конечная схема*

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{pmatrix}.$$

Возвращаясь к тому же примеру игральной кости и предполагая, что кость эта «правильна», т. е. вероятности па-

<sup>1</sup> С. Е. Shannon. Bell. Syst. Techn. Journ., 27, 379—423, 623—656, 1948.

<sup>2</sup> Усп. мат. наук, 8, 3—20, 1953.

<sup>3</sup> См. также С. Гольдман. Теория информации. М., 1957, стр. 149—175.

дения на различные грани равны друг другу, мы можем написать конечную схему:

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \end{pmatrix}.$$

Конечная схема всегда определяет вероятность событий, следовательно, описывает состояние неопределенности. Неопределенность эта может быть различной: от очень небольшой в альтернативе

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ 0,99 & 0,01 \end{pmatrix},$$

где можно почти безошибочно предвидеть вероятный результат  $A_1$ , до максимальной неопределенности в альтернативе

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ 0,5 & 0,5 \end{pmatrix}.$$

Мерой неопределенности конечной схемы

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{pmatrix}$$

служит сумма вероятностей  $p_k$ , помноженных на их логарифмы (при произвольном, но одинаковом основании), взятая со знаком минус:

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = - \sum_{k=1}^n p_k \lg p_k.$$

Эта величина получила название энтропии конечной схемы. Основанием для такого наименования служат некоторые аналогии с известной нам физической величиной. Нетрудно видеть, что  $H(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0$ , если одно из  $p_k$  равно единице, а остальные — нулю. В этом случае неопределенность отсутствует; результат определен достоверным образом. Если все события равновероятны, т. е.  $p_1 = p_2 = \dots = p_n$ , то при фиксированном  $n$  величина  $H$  — наибольшая и схема обладает наибольшей неопределенностью.

В результате испытания, исход которого — события  $A_1, A_2, \dots, A_n$  — описан схемой  $A$ , становится известно, какое из событий  $A_k$  наступило, и неопределенность, измеряемая величиной  $H$ , исчезает. Поэтому величину  $H$  считают мерой информации — процесса, ликвидирующего неопределенность.

До сих пор речь шла о независимых испытаниях, т. е. об испытаниях, исход которых не зависит от исхода предыдущих испытаний. Таково бросание монеты или игральной кости, вынимание шара из урны, когда шар возвращается в урну и т. д. Допустим теперь, что исход любого испытания зависит от предыдущего испытания. При этом событие не обладает определенной вероятностью  $p_q$ , зато двум событиям  $A_i$  и  $A_k$  соответствует условная вероятность  $p_{ik}$ : если в результате испытания произошло событие  $A_i$ , то вероятность того, что результатом следующего испытания будет событие  $A_k$ , равна  $p_{ik}$ . Чтобы определить вероятность  $n$  совместных исходов  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , нужно перемножить условные вероятности  $p_{12}, p_{23}$  и т. д.

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = p_1 p_{12} p_{23} \dots p_{(n-1)n},$$

где  $p_1$  — вероятность исхода  $A_1$  начального испытания.

Последовательности зависимых испытаний, вероятности которых определены подобным образом, называются цепями Маркова. Они введены А. А. Марковым в 1907 г. В приложениях к физике обычно несколько изменяют терминологию: вместо того чтобы сказать: «в результате  $n$ -го испытания произошло событие  $A_k$ » говорят: «в момент времени  $n$  система находится в состоянии  $A_k$ ». Условная вероятность  $p_{ik}$  соответственно называется «вероятностью перехода из состояния  $A_i$  в состояние  $A_k$ ». Переход от одного звена цепи Маркова к другому, т. е. переход из состояния  $A_k$  — результата  $n$ -го испытания в состояние  $A_l$  — результат  $(n+1)$ -го испытания называется иногда «шагом».

Возьмем цепь Маркова описанного типа (это — наиболее простой тип) с конечным числом состояний  $A_1, A_2, \dots, A_n$  и вероятностями переходов  $p_{ik}$  ( $i, k = 1, 2, \dots, n$ ). Если обозначить вероятность состояния  $A_k$  ( $1 \leq k \leq n$ ) через  $P_k$ , то сумма  $P_k$  (когда  $k$  пробегает значения  $1, 2, \dots, n$ ), помноженная на вероятности  $P_{kl}$  переходов из

состояния  $A_k$  в состоянии  $A_l$ , будет равна вероятности состояния  $A_l$ :

$$\sum_{k=1}^n P_k P_{kl} = P_l.$$

Из состояния  $A_i$  система может перейти в следующий момент в одно из состояний  $A_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ). Вероятности переходов  $p_{ik}$ , т. е.  $p_{i1}$ ,  $p_{i2}$  и т. д., будут вероятностями различных состояний  $A_k$  (т. е.  $A_1, A_2, \dots, A_n$ ). Получается конечная схема

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ p_{i1} & p_{i2} & \dots & p_{in} \end{pmatrix},$$

обладающая энтропией

$$H_i = \sum_{k=1}^n p_{ik} \lg p_{ik},$$

зависящей от  $i$ . Мы можем взять среднее значение  $H_i$  для всех начальных состояний  $A_i$ . Каждая  $H_i$  — энтропия конечной системы переходов из начального состояния  $A_i$  в следующее состояние  $A_k$ . Среднее значение энтропии  $H_i$  будет средней энтропией конечных схем (мерой среднего количества информации) при переходе в данной цепи Маркова на один шаг:

$$H = \sum_{i=1}^n P_i H_i = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n P_i p_{ik} \lg p_{ik}.$$

Эта величина характеризует данную цепь Маркова в целом и называется ее энтропией. Она однозначно определяется вероятностями состояний  $P_i$  и переходными вероятностями  $p_{ik}$ . Далее можно получить выражение энтропии для конечной схемы, описывающей поведение системы не при одном ближайшем испытании, а при  $r$  ближайших испытаниях.

В приведенных построениях энтропия фигурирует как некая математическая величина, измеряющая объем информации. Некоторая аналогия между этой величиной и величиной, фигурирующей в термодинамике, дает основание для такого наименования меры информа-

ции. Но не исключена возможность более широкой и общей физической интерпретации энтропии как меры информации. В поисках такой интерпретации нужно прежде всего перейти от информации к объективным физическим процессам, констатация которых является содержанием информации. При таком переходе мере информации соответствует некоторая величина, измеряющая объективные физические процессы, сведения о которых содержатся в информации (если определена элементарная мера таких процессов).

Допустим, что речь идет о механических процессах в самом широком смысле: об изменении состояний механической системы, т. е. о совокупности мировых линий некоторого числа материальных тел. Будем рассматривать макроскопические смещения этих тел. Каждое такое смещение представляет собой некоторую «невероятность». Если материальное тело состоит из большого числа молекул, то движение всех этих молекул в одном и том же направлении, вообще говоря, менее вероятно, чем беспорядочное движение, сохраняющее макроскопическую неподвижность тела. Если в качестве материального тела фигурирует элементарная частица, например электрон, то с точки зрения трансмутационной концепции движения регенерация электрона вдоль определенной мировой линии, вообще говоря, менее вероятна, чем беспорядочные трансмутационные акты в вакууме. Естественной мерой «невероятности» (она, разумеется, пропорциональна мере вероятности) служит действие.

Что же является причиной «невероятности»? Сейчас, вооруженные результатами тридцатилетнего развития квантовой механики, мы можем внести некоторые коррективы в тот ответ, который был когда-то дан Больцманом.

Причиной «невероятности», т. е. определенных конфигураций мировых линий служит взаимодействие микроскопических объектов с макроскопическими. Такое взаимодействие придает определенное значение динамической переменной (за счет неопределенности сопряженной с ней другой переменной). Можно видеть далеко идущую аналогию между этим соотношением микромира и макроскопическими соотношениями. Определенное, неусредненное («невероятное») давление пара обеспечивается взаимодействием молекул с макроскопическим объектом, созда-

ющим температурный перепад, и, далее с цилиндром и поршнем (при этом, чем точнее стенки цилиндра фиксируют положение поршня в каждый момент, т. е. его траекторию, тем больше неопределенность его импульса вследствие трения). Можно думать, что и для Космоса «невероятность», т. е. существование обратимых макроскопических процессов, должна объясняться не флуктуациями, как это думал Больцман, а действием ультрамакроскопических закономерностей. Современные космологические и космогонические представления не дают возможности однозначно указать эти закономерности, но позволяют допустить их существование.

---

---

## VI. ПРИНЦИП БЛИЗКОДЕЙСТВИЯ

Принципы относительности, наименьшего действия, сохранения и необратимости нельзя считать логически независимыми. Если представить принцип относительности в виде требования, чтобы мировые линии совпадали с геодезическими, т. е. кратчайшими линиями, вообще говоря, неевклидова пространства, то становится весьма явственной связь принципа относительности с вариационными принципами. Принципы сохранения так тесно связаны с вариационными принципами, что Лагранж не считал вариационный принцип самостоятельным. Второе начало термодинамики не может быть сведено к первому началу и к механическим принципам, но логически неотделимо от них. Сейчас постепенно выкристаллизовывается общее учение о пространстве и времени, связанное с понятиями относительности, сохранения и необратимости.

Вместе с тем можно констатировать некоторую историческую независимость релятивистских, вариационных, консервативных и статистических принципов физики. В последнем счете она объясняется необходимостью собственно физического, экспериментального критерия правомерности логических построений, при помощи которых связаны друг с другом различные принципы. Здесь и видна их неаприорная сущность.

Поэтому можно довольно точно определить те отрасли физики, из которых эти принципы исторически выросли.

Принцип относительности в классической физике имеет смысл в рамках учения о перемещениях себестоительных объектов, индивидуализированных, выделенных из окружающей непрерывной среды. Такими объектами могут быть и материальные точки в старом смысле твердых

шариков пренебрежимых размеров, и системы точек, и локализованные в пространстве деформации и сингулярности непрерывной среды. В свою очередь модифицируется понятие среды, к которой отнесено движение. В классической механике такой средой служит пустое пространство; классическая механика видит в нем лишь расстояния между движущимся телом и телами отсчета. Само движение рассматривается при этом как изменение указанных расстояний — положения тела в пространстве отсчета. Рассматривая в статистической физике системы материальных точек с большим числом степеней свободы, мы уже не можем говорить об относительном движении таких точек; отдельные движения не рассматриваются вовсе, а их статистический результат характеризуется внутренней энергией и энтропией — величинами, не зависящими от выбора координат.

Далее в физике появилось представление о движении энергии и интерпретирующие эту идею конкретные картины. Это представление, возникшее на основе теории упругости, выросло на почве электродинамики. Классическая термодинамика лишь подготовила его, нарисовав статистически континуализированную среду, где движения дискретных частиц макроскопически игнорировались, но сохранялись за кулисами макроскопической сцены. Картина непрерывного распределения средних величин, о которой говорила классическая термодинамика, была необходимой исторической подготовкой картины непрерывного распределения переменных реального поля — представления, фигурировавшего в электродинамике Фарадея — Максвелла.

В такого рода реальной континуальной среде причинные связи между событиями состоят в распространении деформаций от точки к точке. Величины, характеризующие эти события, могут быть найдены при заданных начальных условиях с помощью дифференциальных уравнений. Но не все процессы, описываемые дифференциальными уравнениями, происходят в реальной континуальной среде.

Мы будем называть принципом близкодействия в классической физике XIX в. представление о распространении взаимодействий дискретных тел через реальную среду. Иначе говоря, принцип близкодействия утверждает реальность силовых полей. Таким образом, генезис принципа

близкодействия состоит в переходе от формального понятия поля к физическому представлению о реальном поле.

Характерные черты и основные принципы классической физики, о которых шла речь в предыдущих главах, были историческим условием такого перехода.

Коллизия близкодействия и далекодействия была одной из основных проблем классической физики, не находивших логически замкнутого, непротиворечивого решения. Такое решение может быть дано квантово-релятивистской физикой.

Главные противоречия понятий далекодействия и близкодействия выявились уже в XVII—XVIII вв. Механическое естествознание с самого своего возникновения старалось исключить из картины мира все предикаты движущегося вещества, кроме положения, скорости и массы. Галилей, выражая эту тенденцию в неопределенной и еще не застывшей форме, отрицал силу тяготения и именно поэтому рассматривал космическое инерционное движение как криволинейное<sup>1</sup>. Декарт, вводя понятие прямолинейного движения по инерции, объяснил в своей теории вихрей искривление траекторий ударами соседних тел. Картезианская физика — попытка универсального кинетического мировоззрения — исключала силы, действующие на расстоянии. Если тело *A* действует на тело *B*, находящееся на некотором расстоянии от него, это значит, что между ними находится ряд промежуточных тел, образующих как бы абсолютно жесткий стержень, передающий импульсы от *A* к *B*. Передача импульса происходит мгновенно. Мгновенно распространяется и свет, представляющий собой смещение абсолютно жесткого стержня (состоящего из частиц второго элемента), соединяющего источник света с глазом. Декарт писал, что конечная скорость распространения света до основания поколебала бы его философию<sup>2</sup>.

Таким образом, нет никакого процесса, происходящего в передающем взаимодействии стержне во времени. Отсюда — произвольность картезианских жестких стержней. Они не являются носителями каких-либо свойств, которые нельзя приписать *A* и *B*. Их можно описывать или

---

<sup>1</sup> См. Б. Кузнецов. Развитие научной картины мира в физике XVII—XVIII вв. Изд-во АН СССР, 1955, стр. 51—52.

<sup>2</sup> Descartes. Oeuvres, publ. p. Adam et Tannery. Т. I, Paris, 1897, p. 307.

не описывать, допускать или отвергать, учитывать или не учитывать, все равно действие  $A$  на  $B$  и  $B$  на  $A$  целиком определяется свойствами  $A$  и  $B$ . Никакие свойства жесткого стержня  $AB$  не определяют взаимодействия  $A$  и  $B$ , кроме длины этого стержня. Поэтому Ньютон и мог заменить стержень  $AB$  простым расстоянием  $AB$ .

Ньютон не имел определенной позиции в вопросе о близкодействии и далекодействии. Он колебался между теологическими концепциями и признанием гравитационного эфира. Но эти колебания никак не отражались в ньютоновых уравнениях гравитационного поля. Уровень экспериментальных возможностей и характер экспериментальных и теоретических задач XVII—XVIII вв. допускал мгновенную передачу взаимодействий в качестве аппроксимации, справедливой для всех известных в то время явлений. Поэтому мгновенная передача взаимодействий и не считалась тогда аппроксимацией. Не было явлений, демонстрирующих ее условность и требующих для своего объяснения более общих и точных представлений.

Эквивалентность феноменологического далекодействия в ньютоновых «Началах» и гипотетических стержней в декартовых «Принципах» открывала дорогу многочисленным попыткам картезианской интерпретации ньютоновой теории тяготения. Но эти попытки не «работали», они не вносили ничего нового в уравнения поля, не стимулировали новых экспериментов. Все дело заключалось в «трехмерном» характере картезианского близкодействия, в отсутствии ненулевого времени распространения взаимодействия в уравнениях поля.

Положение не изменилось, когда наряду с теорией гравитационного поля появилась электростатика и магнетостатика.

Понятие поля в электростатике, как и в теории тяготения, было формальным не только и даже не столько потому, что Ньютон, Кулон, Пуассон и другие не выдвигали какой-либо конкретной гипотезы о среде, передающей гравитационные и электрические силы. Основой формального характера теории поля до Максвелла было представление о мгновенном распространении поля. Значение силы тяготения в данной точке и в данный момент определяется положением тяжелых тел в этот же момент, как бы далеко ни находилась данная точка от центра тяготения. Частица,

несущая электрический заряд, отталкивается от другой или притягивается к ней с силой, зависящей от положения точек в один и тот же момент. Именно таков смысл уравнений теории тяготения и электростатики. Физической интерпретацией уравнений могло быть представление об абсолютно жестких стержнях, мгновенно передающих силы от одного тела к другому. Но такое чисто пространственное близкое действие уже в XVIII в. выглядело бы весьма архаичным. Поэтому теория гравитационных, электрических и магнитных полей была теорией дальнего действия. Неформальные представления о дальнем действии явно выходили за рамки научной картины мира. Поэтому теория поля и сохраняла формальный характер.

В течение XVIII и первой половины XIX в. физики и в еще большей степени философы стремились построить картину взаимодействия, исключавшую *actio in distans*. Такие попытки не приводили к каким-либо физическим теориям, способным указать решающий эксперимент в пользу близкого действия. Выше уже говорилось о ранних попытках этого рода — о картезианских концепциях, интерпретировавших ньютоновы уравнения гравитационного поля. Применительно к электростатике идея близкого действия также не «работала» — и по той же причине: в уравнениях поля не было конечной скорости распространения взаимодействий. Но философский анализ проблемы дальнего действия и близкого действия «работал» в историческом смысле: он расчищал дорогу физическим теориям второй половины XIX в.

Следует сказать, что само понятие близкого действия в классической картине мира было противоречивым. Если «трехмерный» характер близкого действия мог быть преодолен теорией поля, включающей конечную величину скорости распространения, т. е. в рамках классической физики, то противоречие, о котором сейчас идет речь, гораздо глубже, оно могло быть устранено только в неклассических теориях.

Представим себе, что макроскопическая картина дальнего действия получила какое-то кинетическое истолкование. Силы, действующие на расстоянии, сведены к толчкам некоторых скрытых масс, т. е. в последнем счете к микроскопическим импульсам. Тем самым решена старая коллизия динамизма и кинетизма — решена в пользу кинетизма.

Но можно ли кинетически объяснить упругость микроскопических частиц? Можно ли вообще объяснить элементарное близкое действие без допущения микроскопического дальнего действия? Обсуждение этих вопросов приводило к известным антиномиям. В теориях XIX в. элементарный микроскопический удар оказывался сложным процессом. Классическая электродинамика, принесшая идее близкого действия решительную победу, устранила эти вопросы прежде всего потому, что в ней не было элементарных взаимодействий дискретных объектов. Теория относительности, казалось, покончила с механическим дальним действием. Но проблема вновь выплыла на поверхность ( правда, в совсем иной форме) в квантовой теории микромира.

Наряду с философской критикой дальнего действия математическая теория поля расчищала дорогу принципу близкого действия. Разработка математической теории приводила к формальной континуализации картины мира.

В 1777 г. Лагранж ввел в теорию тяготения понятие потенциала<sup>1</sup>, определив силу тяготения как градиент этой величины. Вскоре, в 1782 г., Лаплас<sup>2</sup> показал, что ньютонов закон тяготения эквивалентен уравнению, в котором фигурирует потенциал тяготения  $\phi$ . Уравнение это имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0.$$

Сумма вторых производных от функции по трем координатным осям обычно обозначается символом  $\Delta$  и называется оператором Лапласа. Поэтому уравнение Лапласа может быть записано в виде:

$$\Delta \phi = 0.$$

Оно описывает гравитационное поле вне пространства, занятого тяжелыми массами. Чтобы описать поле тяготения в самом веществе, нужно обобщить уравнение Лапласа. Это было сделано Пуассоном в 1812 г.<sup>3</sup> В общем случае сумма вторых производных  $\phi$  по осям уже не равна нулю, и уравнение Пуассона имеет вид

$$\Delta \phi = 4\pi\rho,$$

<sup>1</sup> Mém. de l'Acad. de Berlin, 1777, p. 155.

<sup>2</sup> Mém. de l'Acad. de Paris, 1785.

<sup>3</sup> Bull. de la soc. philomatique, 1812, p. 3.

где  $\rho$  — плотность массы. Таким образом, теория тяготения перешла на вторую ступень континуализации. Сначала формальным образом сила была заменена величиной, распределенной в пространстве; но эта величина была условным понятием, определяющим силу, действующую через пустоту. В уравнении Пуассона фигурирует уже плотность тяжелого вещества, распределенного, вообще говоря, непрерывно в пространстве. Это уже не условный математический символ теории дальнего действия, а условная физическая картина непрерывного распределения массы.

Пуассон применил понятие потенциала к электростатическим явлениям. Позже, в 1828 г., Грин вывел с помощью понятия потенциала многие соотношения электростатики и магнетостатики. К этому обобщению вело соответствие между законом тяготения и законами притяжения электрических зарядов и магнитных полюсов, установленными Кулоном.

Относительным завершением теории потенциала была работа Гаусса, опубликованная в 1839 г.<sup>1</sup>

С течением времени понятие потенциала потеряло первоначальную связь с понятием силы и приобрело иную основу. Потенциал стали рассматривать в связи с учением об энергии и измерять работой, необходимой для того, чтобы тело оказалось в данной точке, либо работой, произведенной при удалении тела из данной точки в область, где потенциал равен нулю.

Новое представление о потенциале привело к дальнейшей, менее формальной концепции непрерывной среды. Энергия локализована в некоторой области пространства. С течением времени она переходит в другую область. Можно ли считать такой переход движением в реальной физической среде? И можно ли считать такую среду реальной непрерывной?

Выше уже говорилось, что классическая термодинамика Майера, Клаузиуса; Больцмана и Гиббса ввела в физику представление о происходящих в природе реальных макроскопических процессах, несводимых к движению отдельных материальных частиц. С макроскопической точки зрения система, состоящая из движущихся молекул,

---

<sup>1</sup> Gauss. Werke. Bd. V, 1870, S. 195.

непрерывна. Эта непрерывность вовсе не субъективное представление, поскольку существуют объективные закономерности (возрастание энтропии), управляющие течением процессов в макроскопически непрерывной среде, неприменимые к отдельным молекулам и справедливые для статистических результатов большого числа микроскопических движений. В этом состоит статистическая континуализация физической картины мира в результате развития термодинамики и статистической молекулярной физики.

Далее мы увидим, что у Максвелла подобная статистическая континуализация в термодинамике сочеталась с нестатистической континуальной концепцией в электродинамике. Такое соседство бросает свет на исторические истоки представления о реальной континуальной среде. Термодинамика была областью, где появилось представление о макроскопически континуализированной среде. В электродинамике выросло представление о континуальной среде без закулисной микроскопической дискретности. Нельзя отрицать значения термодинамических аналогий для генезиса электродинамики, основанной на идее близкого действия. Но вместе с тем она преемственно связана с электростатикой Пуассона, Грина и Гаусса и электродинамикой Ампера и Вебера, допускавшей действие электрических зарядов через пустоту.

Отправным пунктом развития электродинамики было открытие магнитного поля тока. Весной 1820 г. Христиан Эрстед увидел, как магнитная стрелка, подвешенная над проводником, по которому пробегает ток, поворачивается и становится перпендикулярно к проводнику. В июле того же года Эрстед описал это явление в сообщении, разосланном крупнейшим физикам. Осенью 1820 г. на собрании натуралистов в Женеве де ля Рив повторил опыты Эрстеда. В этом собрании участвовал Араго. Когда Араго, возвратившись в Париж, привез известие об открытии Эрстеда, Ампер немедленно приступил к разработке новой области физических явлений.

Основная идея Ампера состояла в том, чтобы свести магнитные действия к электрическим. Он сопоставил явление Эрстеда с электростатическим притяжением и отталкиванием. Последнее имеет чисто электрическую природу: наэлектризованное тело притягивает и отталкивает другое тело потому, что в последнем под влиянием электростати-

ческой индукции также возникает электрический заряд. Таким образом, здесь взаимодействие масс целиком сводится к взаимодействию зарядов. Нельзя ли свести действие электрического тока на магнитную стрелку также к взаимодействию между электрическими токами. Исходя из этой теоретической позиции, Ампер и приступил к своим экспериментам, которые привели его к открытию притяжения и отталкивания проводников, по которым пробегает электрический ток.

18 сентября 1820 г. Ампер сообщил о своем открытии: проводники, по которым протекают токи гальванической батареи, притягиваются в том случае, когда токи имеют одинаковое направление, и отталкиваются, когда они имеют противоположное направление. Итак, оказалось, что взаимодействие токов отличается от взаимодействия зарядов. Предложив назвать новые явления, связанные с взаимодействием электрических токов, электродинамическими в отличие от явлений электрического взаимодействия зарядов, Ампер приступил к дальнейшему исследованию. Он обнаружил полную аналогию между магнитными стрелками и проводящими контурами при действии на них тока. Одна из важных задач экспериментальной техники состояла в устранении земного магнетизма. Наилучшим образом этой задаче соответствовала астатическая стрелка, состоявшая из двух магнитных стрелок, соединенных параллельно, с полюсами, направленными в разные стороны. С помощью подобных устройств Ампер показал с полной очевидностью поперечность сил, действующих на стрелку или на подвижный проволочный контур с током. Далее оказалось, что спиральный проводник, названный Ампером соленоидом, действует аналогично магниту, причем ponderomotorная сила перпендикулярна направлению тока, так что ось спирали соответствует оси магнита.

Отсюда вытекало новое воззрение на природу магнетизма. Магнитные свойства можно было целиком объяснить наличием электрического тока, направленного перпендикулярно оси магнита. Это относится как к земному магнетизму, так и к естественным магнитам. Можно было отбросить мысль об объясняющих земной магнетизм громадных массах магнитного железняка в Земле. Эту мысль можно было заменить гипотезой электрического тока, протекающего в Земле с востока на запад. Что касается постоянных

магнитов, то здесь эксперименты Ампера полностью устранили необходимость в особой магнитной жидкости. Ампер предполагал, что естественный магнит приобретает свои свойства благодаря круговым токам, перпендикулярным к оси магнита. Впоследствии Ампер пришел к идее молекулярных круговых токов. Магнит состоит из элементарных магнетиков, представляющих собой элементарные замкнутые токи в молекулах магнита. При намагничивании оси элементарных магнетиков приобретают одинаковые направления. Электрический ток всегда возбуждает магнитное поле. Неподвижные электрические заряды создают электрическое поле, а движущиеся, сверх того, — еще и магнитное.

Из сказанного видно, что электродинамика вступила в противоречие с физикой центральных сил. Магнитный полюс испытывает поперечное воздействие со стороны заряда не по направлению к последнему и не от него, а перпендикулярно к движению заряда. Далее, сила взаимодействия зависит от скорости движения зарядов. Это стало очевидным во второй половине XIX в., когда Роуланд заменил ток движением заряда. Роуланд наблюдал эффект движения небольшого электрического заряда по окружности, в центре которой находилась магнитная игла. Оказалось, что движущийся заряд действует на магнитную иглу так же, как круговой электрический ток. По существу опыт Роуланда лишь заменил в опыте Эрстеда ток движением заряда. Эффект был тот же самый. Магнитная стрелка отклонялась в направлении, перпендикулярном плоскости движения заряда. Чем быстрее двигался заряд, тем сильнее отклонялась магнитная стрелка. Таким образом, не только направление силы не находило аналогии в механике, но наряду с этим появилось новое обстоятельство: электрическая сила оказалась зависящей от скорости тел. Основной тезис механики центральных сил — зависимость силы исключительно от расстояния — не мог иметь применения к новой области явлений. Всё это стало ясным в семидесятые годы XIX в. Но уже во времена Ампера бросалось в глаза отклонение электродинамики от классической динамики центральных сил. Ньютонова динамика связывала силы взаимодействия тел с их массами и расстояниями. Согласно классическому принципу относительности, эффект силы не зависит от движения тел. Для Ампера ис-

ходным понятием служит механическая сила и сила тока. Он не связывает это понятие с какими-либо свойствами электрических жидкостей, с присущими им специфическими силами. Два элемента тока действуют один на другой прямо пропорционально произведению сил тока и обратно пропорционально некоторой степени расстояния. Указанная зависимость была установлена Ампером эмпирически и относилась лишь к таким явлениям, которые им наблюдались. Впоследствии Вебер счел возможным на основе открытий Ампера и Фарадея высказать общий принцип, подобный ньютонову закону тяготения, из которого можно было бы вывести ряд электродинамических закономерностей. Такой общий принцип состоял в обобщении электростатики и электродинамики, иначе говоря, — законов Кулона и Ампера. Чтобы сопоставить электродинамику и электростатику, нужно было бы связать силу тока с основным понятием электростатики — с количеством электричества. Сила тока соответствует некоторому количеству электричества, пребывающему в данном пространстве в течение некоторого промежутка времени.

Сила тока пропорциональна количеству электричества, протекающему в единицу времени через данное сечение проводника. Поэтому силу тока можно определить как произведение количества положительного электричества, находящегося в проводнике, длина которого равна единице, на скорость электрического тока и некоторый коэффициент пропорциональности между количеством электричества и силой тока. Из этих элементарных связей Вебер получил общий результат, совпадавший с законом Ампера. С другой стороны, он разложил соотношение Ампера на элементарные действия, совпадавшие с его теоретическими расчетами. Таким образом он пришел к основному электродинамическому закону, в который входит уже не сила тока, как у Ампера, а количество электричества. Из электродинамики Вебера следовало, что взаимодействие электрических зарядов зависит не только от них самих, но также от скорости и ускорения зарядов. Новый принцип, противоречивший ньютоновой механике, вызвал к жизни одну из первых попыток подчинить теорию тяготения новым законам электромагнитных явлений. В 1846 г. Вебер указал, что его законы можно было бы перенести и на тяготение, и это почти не изменило бы астрономических вели-

чин, вычисленных с помощью механики Ньютона. В семидесятые годы Цельнер выдвинул электродинамическую концепцию тяготения, согласно которой ньютоново притяжение подобно электродинамическим силам зависит от движения взаимодействующих масс. В своей книге «О природе комет» (1872 г.) Цельнер показывает, что зависимость тяготения от движения тел, т. е. замена ньютонова закона законом Вебера, приводит почти к тем же результатам: получается небольшое отклонение движения перигелия Меркурия, еще меньшее отклонение для Венеры и различие совсем исчезает для прочих планет. Отсюда Цельнер сделал вывод о тождестве тяготения и электрических сил. Согласно Цельнеру, тела обладают инерцией, непроницаемостью и разноименными электрическими зарядами, причем потенциал двух разноименных зарядов на чрезвычайно малую величину отличается от потенциала одноименных зарядов. Согласно Ньютону, гравитационный потенциал пропорционален произведению массы и обратно пропорционален расстоянию. Отсюда следует, что при сближении весомых тел на бесконечно малое расстояние потенциал приобретает бесконечно большое значение и, следовательно, в каждом атоме весомого вещества содержится бесконечная потенциальная энергия. Такая точка зрения противоречит закону сохранения энергии. Поэтому Цельнер рассматривает ньютонов закон всемирного тяготения как неточное приближение к действительному закону гравитационного взаимодействия тел. По мнению Цельнера, точный закон совпадает с законом Вебера, согласно которому гравитационный потенциал равен произведению масс, деленному на расстояние. Но эта величина должна быть умножена на  $(1 - v^2/c^2)$ .

Таким образом, закон Вебера дает для потенциала взаимодействия масс выражение:

$$\frac{mm'}{r} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right).$$

Если тяготение соответствует приведенной формуле, то при уменьшении расстояния потенциал не может возрасти до бесконечности, так как его возрастание уравновешивается растущей скоростью  $v$  и выражение в целом стремится к некоторому максимальному пределу, зависящему от постоянной  $c$ . По мнению Цельнера, закон Ньюто-

на достаточен для описания макропроцессов, но для взаимодействия между атомами, для микромира он требует вышеуказанной поправки.

Электродинамика Вебера сделала весьма осязаемой невозможность свести электродинамические законы к классической механике. Но здесь выявилась и другая сторона дела, имевшая не меньшее значение среди различных истоков теории Максвелла. В 1846 г. Вебер ввел понятие кинетического потенциала. Два заряда  $e_1$  и  $e_2$  на расстоянии  $r$ , движущиеся относительно друг друга со скоростью, радиальная составляющая которой равна  $dr/dt$ , характеризуются кинетическим потенциалом

$$P = \frac{e_1 e_2}{r} (1 - a^2 \dot{r}^2),$$

а сила их взаимодействия равна

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2} (1 - a^2 \dot{r}^2 - 2a^2 r \ddot{r}).$$

Постоянная  $a$  входит в выражение отношения электростатической единицы количества электричества к электромагнитной. Это отношение равно  $1/a\sqrt{2}$ . В 1855 г. Вебер и Кольрауш<sup>1</sup> экспериментально определили величину постоянной  $a$ , и оказалось, что  $1/a$  очень близка к скорости света  $c$ . Впоследствии, впрочем, выяснилось что

$$a^2 = \frac{1}{2c^2}.$$

Это совпадение ни у Вебера, ни у других физиков до Максвелла не стало основой каких-либо определенных выводов о природе света, что очень ярко демонстрирует несводимость движущих сил науки к логике экспериментальных данных. Теория Вебера исходила из фундаментального отличия магнитного поля тока от ньютоновых сил. Но и Вебер не отошел от дальнего действия. Он находился под влиянием ньютоновской традиции, в то время как Фарадей исходил из новых идей.

Порвать с традицией было нелегко, да и новые факты, свидетельствуя в пользу близкого действия, ещё не включали окончательных аргументов.

<sup>1</sup> Работа Вебера и Кольрауша имеется в русском переводе в сборнике «Из предистории радио». М.— Л., 1948.

Гаусс в одном из писем к Веберу (1845) рассказывает о своем намерении дать новое обоснование электродинамики, основанное на близкодействии. По мнению Гаусса, идея совпадения скорости распространения взаимодействия между электрическими зарядами со скоростью распространения света, должна быть исходным принципом всей электродинамики. Однако Гаусс понимал, что такая новая концепция должна опираться на более широкий круг эмпирических данных, чем тот, которым располагала электродинамика сороковых годов. Поэтому идея близкодействия осталась лишь в эпистолярном наследстве Гаусса подобно ряду других смелых идей.

Идея близкодействия принимала подчас чисто математическую форму. В замечательной статье Римана, написанной в 1858 г., индукция выводилась из некоторого уравнения, представлявшего собой модификацию уравнения Пуассона и аналогичного уравнению распространения волн в упругой среде. Порой появлялись и попытки связать представление об эфире, передающем электрические взаимодействия, с результатами формально-математического развития электростатики. Но в целом в науке середины XIX в. господствовали представления о взаимодействии электрических зарядов через пустоту.

Одной из предпосылок количественной теории, с необходимостью вводящей близкодействие, была электромагнитная система единиц. Только что говорилось об отношении электромагнитной единицы электричества к электростатической. Эти понятия связаны с электродинамикой Вебера. Силу тока удалось свести к движению электрических зарядов. Это позволило соединить количество электричества через пропорциональную ему силу с единицами пространства, времени и массы. Систему единиц, выведенных только из этих трех, Гаусс и назвал абсолютной системой. Гаусс принял секунду за единицу времени, миллиметр за единицу длины и миллиграмм за единицу массы. Отсюда получилась единица силы, — сила, которая в одну секунду сообщает одному миллиграмму ускорение, равное приращению скорости на миллиметр в секунду в течение одной секунды. Впоследствии в основу абсолютной системы единиц были положены сантиметр, грамм и секунда.

Полвека спустя Планк упрекал систему абсолютных единиц в субъективности. Сантиметр, секунда и грамм те-

ряют объективное значение вне Земли, потому что сантиметр — это некоторая часть окружности планеты, секунда установлена в качестве некоторой части периода вращения Земли, грамм теряет физическую связь с сантиметром, если нет воды. Планк считает более объективными единицы длины, времени, массы и температуры, основанные на постоянных теплового излучения. Они настолько независимы от земных условий, что даже обитатели Марса должны когда-нибудь натолкнуться на них. Максвелл советовал ученым, желающим, чтобы их книги были долговечнее земного шара, пользоваться волновыми константами как основой системы мер.

В качестве единицы магнитной массы Гаусс предложил такую массу, которая, действуя на равную ей массу, находящуюся на расстоянии, равном единице, дает силу, также равную единице. Аналогичное определение могло служить и для электростатики. Достаточно было сказать, что единицей заряда будет такое количество электричества, которое действует на равный ему заряд на расстоянии, равном единице, с силой, равной единице силы. В электродинамике это определение было неприемлемо, так как сила зависит здесь не только от электрического заряда, но и от скорости его движения. Но сама скорость может быть определена единицами пространства и времени. Поэтому Вебер предложил считать единицей силу тока, возникающего при прохождении через каждое поперечное сечение цепи в единицу времени единицы свободного положительного электричества в одном направлении и отрицательного — в противоположном. Непосредственно определить силу тока нельзя, так как мы не можем измерить количество электричества и скорость его движения в проводнике. Сила тока определяется по его действиям — химическим, магнитным и электродинамическим. Соответственно, Вебер говорит о трех мерах силы тока. Электролитическая единица силы тока равна силе тока, который в единицу времени разлагает грамм воды на кислород и водород. Магнитная единица соответствует току, который, обтекая площадь в квадратный сантиметр, действует аналогично магниту, обладающему единицей магнитной массы. Электродинамическая единица силы тока — это сила тока, проходящего по проводнику и действующего на другой такой же ток с силой, равной единице.

В истории физики идея близкодействия отнюдь не была однозначным логическим выводом из определенных экспериментов; она вытекала из обобщения развивающегося естествознания, из глубокого и неустранимого противоречия между дальнодействием и общими идеями научного объяснения природы. Редко, где можно найти такую яркую иллюстрацию значения широких философских обобщений для развития науки, как в генезисе принципа близкодействия.

Гений эксперимента, Фарадей, давший образцы тщательных экспериментальных исследований и образцы точного и объективного описания их результатов, в своем творчестве отчетливо показал, что общие идеи не только выводятся из экспериментов, но и обгоняют их, толкают исследователя к новым экспериментам, определяют их направление. Во всех своих исследованиях Фарадей исходил из принципа единства сил природы и принципиальной возможности превращения одного вида силы в другой с сохранением количественной эквивалентности. В «Экспериментальных исследованиях по электричеству» он писал:

«В дальнейшем мы, может быть, будем в состоянии сравнивать друг с другом корпускулярные силы, как силы тяготения, сцепления, электричество и химическое средство, и тем или иным путем определять по их действиям их относительные эквиваленты»<sup>1</sup>.

Для Фарадея принципы сохранения вытекают из невозможности вечного движения, в конце концов — из причинности. Чтобы отказаться от этих принципов «надо принять возможность вечного движения, огня без тепла, тепла без источника теплоты, действия без противодействия, причины без действия, действия без причины... Подобно тому как химик обязан всем совершенством своей науки употреблению весов, никогда не обманывающих его на счет веса тела, физик может от начала сохранения ждать уверенности в выводах и главной помощи в исследованиях. Все, чем мы владеем, все, что есть у нас хорошего и верного, паровая машина, электрический телеграф и пр., суть свидетельства истины этого великого начала»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, сер. XIV, § 1686. М.—Л., 1947, стр. 705.

<sup>2</sup> Experimental Researches in Chemistry and Physics, London, 1859, p. 460.

В этой выдержке интересно отметить ясное понимание связи между количественным экспериментом и научной формой законов сохранения, которую приобретает общая логическая идея эквивалентности причины и действия. Следует также подчеркнуть отмеченную Фарадеем связь между принципом сохранения и техникой. Фарадей говорит о паровой машине и электрическом телеграфе. В теории паровых машин количественные измерения энергии и эквивалентность тепла и работы были действительно основным содержанием, но для телеграфа энергетическая сторона представлялась несущественной. Однако, если для паровой техники представлялись важными и количественная, и качественная сторона закона сохранения, то для телеграфа принципиально важной была качественная сторона — возможность преобразовать электричество в механическое движение якоря электромагнитного телеграфного аппарата.

Во времена Фарадея наука знала множество различных «электричеств»: электричество трения, атмосферное, гальваническое, животное и т. д. Фарадей опытным путем, вызывая одни и те же действия электричеством из различных источников, доказал его тождественность. Результаты этих опытов были в 1833 г. изложены Фарадеем в «Экспериментальных исследованиях по электричеству»: «Общее заключение, которое, как я полагаю, следует сделать из этой совокупности фактов, состоит в том, что отдельные виды электричества тождественны по своей природе, каков бы ни был их источник»<sup>1</sup>.

Фарадей апеллировал к закону сохранения сил, чтобы доказать единство электрических и химических явлений. Он занялся изучением химического действия электричества с количественной стороны, именно со стороны количественных отношений между электричеством и химическими веществами, полученными в результате электролиза. Чтобы оперировать с экспериментально полученными данными и создать теорию электролиза, Фарадей ввел терминологию, удержавшуюся поныне. Он назвал заряженные движущиеся частицы ионами и затем, представляя себе

---

<sup>1</sup> Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1, сер. 3, § 7, п. 360. М., 1947, стр. 145.

движение положительных зарядов по аналогии с потоком жидкости (иначе говоря, сравнивая электрическое поле с гравитационным), Фарадей назвал катионами, т. е. «нисходящими», частицы, имеющие положительный заряд, и анионами — частицы, несущие отрицательный заряд. Фарадею принадлежат и отдельные термины, относящиеся к электролизу, и самый термин «электролиз». Он назвал разлагаемое вещество — электролитом, поверхности проводников, опущенных в жидкость, — электродами (проводник, возле которого выделяется кислород, — анодом, а водород — катодом). Эта номенклатура вытекала из идеи близкодействия. Фарадей хотел полностью отказаться от представления об электрических полюсах, к которым якобы притягиваются составные части раствора. Традиционные термины, относящиеся к электролизу, по мнению Фарадея, основаны на идее далекодействия.

«Таков термин полюс с его прилагательными обозначениями — положительный и отрицательный и связанные с ними представления о притяжении и отталкивании. Согласно общепринятой терминологии, положительный полюс притягивает кислород, кислоты и т. д., или, выражаясь более осторожно, заставляет их выделяться на своей поверхности, а отрицательный — точно таким же образом действует на водород, воспламеняющиеся вещества, металлы и основания. С моей же точки зрения, производящая эти явления сила заключена не в полюсах, а внутри разлагаемого вещества, кислород и кислоты выделяются у отрицательного конца этого вещества, а водород, металлы и пр. у его положительного конца»<sup>1</sup>.

С точки зрения Фарадея, «полюсы, как их обычно называют, представляют собой лишь ворота, или пути, через которые электрический ток входит и выходит из разлагаемого вещества; соприкасаясь с этим веществом, они естественно являются границами его протяжения в направлении тока»<sup>2</sup>.

Из принципа близкодействия вытекает, таким образом, не только терминологии, но и само существо электрохими-

---

<sup>1</sup> Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1, серия VII, п. 661, М.—Л., 1947, стр. 265—266.

<sup>2</sup> Там же, серия VII, п. 662, стр. 266.

ческих идей Фарадея. Он сводил электролиз к преодолению химических сил сродства, электрических по своей природе.

«Подвергаемое разложению вещество можно рассматривать как совокупность действующих частиц, причем все те из них, которые расположены на пути тока, вносят свою долю в конечный эффект; обычное химическое сродство под влиянием электрического тока делается менее выраженным, ослабляется или частично нейтрализуется в одном направлении, параллельном току, и усиливается или пополняется в противоположном направлении, а именно поэтому входящие в соединение частицы имеют стремление перемещаться в противоположных направлениях»<sup>1</sup>.

Если электролиз объясняется электрической природой химических связей, то нейтрализация этих связей всегда требует одного и того же количества электричества. Фарадей в ряде экспериментов исследовал зависимость количества водорода, выделявшегося из воды в результате электролиза, от напряжения и силы электрического тока. Он пришел к выводу, что количество водорода не зависит ни от силы тока, ни от величины электродов, ни от сопротивления воды, а лишь от количества электричества, прошедшего через электролит. Поэтому Фарадей построил электрохимический прибор для измерения количества электричества — вольтметр. Он ввел в цепь тока вольтметр и сосуд, в который наливались не только водные растворы, но и расплавленные соединения металлов. Вольтметр показывал, что одинаковое количество электричества, прошедшего через электролит, всегда приводит к выделению одного и того же количества химического вещества. Опыты привели к двум основным законам электролиза, из которых первый устанавливает пропорциональность между массой выделившегося вещества и количеством электричества, а второй связывает коэффициент пропорциональности с химическим эквивалентом. Из этих законов, как впоследствии показал Гельмгольц, вытекает, что каждая частица вещества переносит определенное количество электричества или кратное ему.

Во второй половине тридцатых годов основным содержанием научного творчества Фарадея стало формулиро-

<sup>1</sup> Там же, серия V, п. 518, стр. 205—206.

вание общих принципов, относящихся к природе электричества. Исходным явлением для постановки этой проблемы была электростатическая индукция.

Рядом опытов Фарадей доказал, что электростатическая индукция зависит от среды. Он заменил проводящую жидкость в электролитической ванне — непроводящей. Металлические пластинки, опущенные в нее, образуют конденсатор с определенной емкостью. Оказалось, что емкость этого конденсатора меняется в зависимости от того, какая именно непроводящая жидкость находится в ванне. Здесь нет перемещения заряженных частиц жидкости. Заряды действуют один на другой через непроводящую среду, причем не только расстояние, но и характер среды определяет взаимодействие зарядов. Следовательно, с емкостью конденсатора связана какая-то определенная деформация. Понятие деформации среды и было положено Фарадеем в основу учения об электричестве. Дискретные заряды оказались связанными между собой упругими деформациями непрерывной среды. Заряды не проникают вглубь проводника, так как на их поверхности оканчивается диэлектрическая среда — носительница действительных электрических процессов. Рисую упругие деформации в эфире, Фарадей не объяснял их наличием зарядов в проводниках. Наоборот, эти деформации и есть самая сущность процесса, а заряды на концах силовых упругих трубок — вторичное явление.

Изложенная теория не принесла бы победы идее близкодействия, если бы Фарадей не открыл новой области электрических явлений. Как уже говорилось, статические электрические и магнитные поля могут быть описаны как с точки зрения дальнего действия, так и в свете учения об эфире, при помощи одного и того же математического аппарата — дифференциальными уравнениями, не включающими изменений во времени.

Принцип действия на расстоянии был систематически применен к объяснению электрических явлений во второй половине XVIII в. В 1759 г. Эпинус стал рассматривать электрическое притяжение и отталкивание как силы, действующие на расстоянии, подобно ньютонову тяготению. Началом математической разработки электростатики был закон взаимодействия электрических зарядов. Он был найден Пристли и независимо от него — Кавендишем в

шестидесятые-семидесятые годы XVIII в. Но закон носит имя Кулона, который подтвердил его непосредственным измерением. Согласно закону Кулона, два небольших по сравнению с расстоянием между ними тела притягивают и отталкивают друг друга с силой пропорциональной произведению их зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния. Этот закон стал исходным пунктом математической разработки электростатики. Ее основные задачи сводятся к следующему. Дана система проводников и указано общее количество электричества. Нужно вычислить, как распределяется заряд и какие силы притяжения и отталкивания возникнут между зарядами. Эти задачи решались с помощью дифференциальных уравнений, рисующих непрерывное изменение напряженности электрического поля от точки к точке. Величина, связанная с непрерывно меняющейся напряженностью — потенциал — стала центральным понятием электростатики. Теория электрического потенциала опиралась на дифференциальные уравнения и рассматривала бесконечно малые приращения напряженности от одной точки к другой, непосредственно примыкающей к ней. Подчеркнем еще раз: непрерывный характер указанной основной для электростатики величины не означает еще, что электростатика превратилась в теорию близкодействия, что в теорию электричества вошло представление о действии через некоторую непрерывную физическую среду. Без элементов, указывающих изменение во времени, дифференциальные уравнения могут оставаться математическим аппаратом теории дальнего действия.

Фарадей экспериментально показал, что в зависимости от той или иной среды меняется сила притяжения или отталкивания зарядов. В пустоте она больше всего, а в других средах меньше, причем каждому диэлектрику соответствует постоянная величина, которая должна войти в формулу закона Кулона. Это — диэлектрическая постоянная  $\epsilon$ . Чем больше она превышает единицу, тем значительно меньше уменьшаются кулоновы силы. Формула приобретает вид:

$$F_e = \frac{1}{\epsilon} \frac{e_1 e_2}{r_{12}^2}.$$

Для эфира  $\epsilon = 1$ , для других диэлектриков  $\epsilon > 1$ . Аналогичным образом притяжение и отталкивание магнитных

полюсов также зависят от среды. Пустота, т. е. эфир, и всякая другая промежуточная среда характеризуется постоянной магнитной проницаемостью  $\mu$  и закон взаимодействия магнитных полюсов приобретает вид:

$$F_e = \frac{1}{\mu} \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}$$

Понятие магнитной проницаемости было выведено на основе многочисленных экспериментов. Фарадей стремился показать, что полюсы магнитов в некоторой степени действуют на всякую среду. Для этого он подвешивал различные немагнитные материалы под полюсами сильных магнитов. В конце концов ему удалось доказать, что магниты действуют на все тела, причем некоторые из них под влиянием магнита располагались перпендикулярно оси магнита. Такие тела Фарадей назвал диамагнитными, а обычные магнитные тела он впоследствии назвал парамагнитными. К диамагнитным телам относятся стекло, хрусталь, фарфор, висмут, ртуть, серебро, медь и т. д. Фарадей в конце концов объяснил диамагнетизм тем обстоятельством, что диамагнитные тела обладают меньшей восприимчивостью к магнетизму, чем окружающая среда. Для подтверждения этой гипотезы Фарадей долго изучал действие магнита на газы. Опыты привели к заключению, что по отношению к атмосферному воздуху кислород оказывается парамагнитным, а все прочие газы — диамагнитными.

Из явлений диамагнетизма можно сделать вывод, что среда, окружающая магнит, если даже она кажется пустой, может обладать магнитными свойствами.

Ряд экспериментов Фарадея был посвящен доказательству взаимной зависимости между магнетизмом и молекулярными силами. Такая взаимная зависимость должна была сказаться в воздействии кристаллической структуры вещества на распространение магнетизма. В результате экспериментов Фарадея было установлено, что ряд тел располагается в магнитном поле таким образом, что кристаллографические и оптические оси становятся параллельно или перпендикулярно оси магнита. Фарадей вывел из этих экспериментов заключение о связи магнитных сил с другими силами природы.

Теория магнетизма, подобно фарадеевой теории электрического поля, не противоречила коренным образом фи-

зике дальнего действия. И та, и другая пользовались понятием среды, характеризующейся диэлектрической постоянной в случае электрического поля и магнитной проницаемостью в случае магнитного поля. Но действие через эту среду не зависело явным образом от времени. Переходом к иному кругу взаимодействий было открытие электромагнитной индукции. В следующем году, после открытия Ампера, Фарадей пришел к мысли об обратном процессе — о возбуждении тока магнетизмом. В 1822 г. в его тетради появляется запись: «Превратить магнетизм в электричество». Это было достигнуто долгими годами непрерывных экспериментов, которые 29 августа 1831 г. привели к открытию.

Из закона электромагнитной индукции, как его сформулировал Фарадей, вытекало, что индуцированная электрическая сила зависит от изменения магнитного поля во времени, от скорости этого изменения. Открытие электромагнитной индукции показало, что электродвижущая сила в проводнике возникает каждый раз, когда возрастает или уменьшается магнитное поле. Фарадей сделал отсюда заключение, что в пространстве, окружающем магнит, физическая среда претерпевает некоторую деформацию и возвращается в первоначальное состояние, когда магнит исчезает. Изменение этого состояния вызывает электродвижущую силу. В чем сущность этого особого состояния среды, изменение которого вызывает индуктивные токи? Фарадей назвал это состояние *электротоническим* и приступил к его экспериментальному исследованию. В результате было разработано учение о силовых линиях. Имеют ли эти линии физическую реальность? Фарадей решительно утверждал реальность физического существования силовых линий. В статье «О физическом характере линий магнитной силы», написанной в 1852 г., он пишет: «Что касается важного вопроса, подлежащего рассмотрению, то он заключается только в том, имеют ли линии магнитной силы физическое существование или нет»<sup>1</sup>. Ответ Фарадея положительный. Отличие точки зрения Фарадея от взглядов сторонников дальнего действия прекрасно сформулировано Максвеллом во введении к «Трактату об электричестве и магнетизме». «Фарадей своим мысленным взором видел линии сил,

<sup>1</sup> Phil. Mag., 3, 401—428, 1852.

проходящие через все пространство там, где математики видели центры сил, притягивающиеся на расстоянии. Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояния. Фарадей искал источник явлений в реальных процессах, происходящих в среде. Они же были удовлетворены тем, что нашли его в действующей на расстоянии силе. приложенной к электрическим флюидам»<sup>1</sup>.

Для мыслителей дофарадеевского периода чаще всего сила была либо непротяженной субстанцией, либо условным понятием. Для Фарадея понятие силы совпадает с понятием силовой линии, причем последнее — отнюдь не геометрическое, а физическое понятие. Концепция Фарадея представляет собой величайший переворот в воззрениях на силу. В течение всего развития механического естествознания и силу и тем более то направление, в котором она действует, не считали материальными протяженными субстанциями. Для Фарадея сила — это линия силы, а линия силы — это совершенно реальное физическое образование. В этом состоит руководящий принцип идей Фарадея, относящийся к тяготению, магнетизму, электричеству, строению вещества и эфира.

В письме к Тейлору Фарадей излагает свои основные воззрения на природу вещества и эфира. Основное наблюдение, которое не позволяет Фарадею принять обычную атомистическую теорию, состоит в явлениях проводимости. Предположив, что тела состоят из вещественных атомов, разделенных пустым пространством, мы должны заключить, что все тела будут проводниками, если пустое пространство проводит электрический ток, и изоляторами, если оно не проводит тока.

«Отсюда как будто следует, что, принимая обычную атомную теорию, надо считать пространство непроводником в непроводящих телах и проводником в проводящих, но такой окончательный вывод является полным провалом этой теории, ибо если пространство изолятор, оно не может существовать в проводящих телах, а если оно проводник, то оно не может существовать в изолирующих телах»<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Русск. перевод в книге «Из предистории радио». М.-Л., 1948, стр. 107.

<sup>2</sup> М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. II. М.-Л., 1951, стр. 395.

Поэтому Фарадей приходит к иной концепции, которой очень трудно подыскать аналогию в истории науки. Обычные факты, которые в глазах физиков и химиков первой половины XIX в. служили доказательством атомистической структуры вещества, хорошо известны Фарадею. Но, по его мнению, они свидетельствуют лишь о наличии определенных центров силы. Здесь Фарадей на первый взгляд приближается к концепции Босковича. Он пишет:

«Если нам приходится вообще делать гипотезы,— а действительно в отрасли знания, подобной настоящей, мы едва ли можем обойтись без этого,— то самым надежным будет делать их как можно меньше, и в этом отношении атом Босковича, как мне кажется, имеет большое преимущество перед всеми обычными представлениями. Его атомы, если я правильно понимаю, являются просто центрами сил, или действия, а не частицами материи, на которых эти силы находят. Если в обычном взгляде на атом мы назовем частицы материи без их действия  $a$  и систему сил или действий в них и вокруг них —  $m$ , тогда в теории Босковича  $a$  исчезает или является просто математической точкой, в то время как в обычном представлении — это небольшой, неизменяемый, непроницаемый кусочек материи, а  $m$  является атмосферой сил, сгруппированных вокруг нее»<sup>1</sup>.

В атомистических концепциях, объясняющих ряд явлений кристаллографии, химии и магнетизма, размеры атомов не существенны.

С точки зрения Фарадея, протяженное твердое ядро, окруженное пустым пространством, уступает место точечному центру, который находится в материальной среде. Не нужно забывать, что силы, сходящиеся в этом точечном центре, для Фарадея отнюдь не абстрактные понятия, а реальные протяженные материальные субстанции. Фарадей как бы оборачивает динамическую концепцию Босковича. Он согласен, что свойства атома связаны с силами и что лишь динамические характеристики обеспечивают индивидуальность атома. Но отсюда следует чрезвычайно смелый и неожиданный поворот мысли. Материя не растворяется в силах, как это было у динамистов, а напротив, силы становятся материальными и пустая среда

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 211.

становится непрерывной материальной средой, совокупностью материальных субстанций — сил. Приводим отрывок из его письма к Тейлору.

«Поэтому для меня *a*, или ядро, исчезает, а вещество состоит из сил или *m*, в самом деле, какое представление мы можем составить себе о ядре независимо от его сил? Все наши наблюдения и знания об атоме, самое наше воображение — ограничиваются представлениями об его силах: на какую же мысль можно еще опереть наше представление о некоем *a*, не зависящем от признанных сил? Мозг только что приступивший к этому вопросу, возможно найдет затруднительным думать о силах материи, независимых от чего-то отдельного, что должно называться материей, но, конечно, гораздо труднее и даже невозможно думать или воображать эту материю не зависящей от сил. Но силы нам известны, и мы узнаем их в каждом явлении Вселенной, а отвлеченную материю — ни в одном; зачем же тогда предполагать существование того, чего мы не знаем, чего мы не можем себе представить и для чего нет никакой научной необходимости?»<sup>1</sup>

Фарадей против материи, выключенной из мира сил и действий. Этот мир, согласно Фарадею, охватывает среду. Если считать атомы центрами сил, «...материя присутствует везде, и нет промежуточного пространства, не занятого ею»<sup>2</sup>. Фарадей возвращается к абсолютной заполненности пространства. Но его концепция отнюдь не картезианская и не кинетическая в старом картезианском смысле. Фарадей не сводит силы к движению дискретных частей вещества; наоборот, для него силовое поле и представляет собою материальную субстанцию, заполняющую пространство. Это далеко от динамизма Босковича, но это далеко и от классической атомистики. Идея Фарадея заключается в материальности силового поля. Атом представляет собой центр реального физического образования: «...если представлять себе атом как центр сил, тогда то, что обычно подразумевается под термином форма, будет относиться к расположению и к относительной интенсивности сил»<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству. Том II. М.-Л., 1951, стр. 400.

<sup>2</sup> Там же, стр. 400—401

<sup>3</sup> Там же, стр. 402.

Если сила направлена от данного центра единообразно во все стороны, тогда поверхность равной интенсивности силы будет сферой. Если же эти силы убывают с расстоянием по-разному в разных направлениях, тогда поверхность равной интенсивности, соответствующая форме атома, может быть поверхностью сфероида или любого другого геометрического тела. Отсюда вытекает взаимная проницаемость материи. Границы каждого атома простираются, по крайней мере, до границ солнечной системы.

«Высказанный здесь взгляд на строение материи, по-видимому, неизбежно влечет за собой вывод, что материя заполняет все пространство, на которое распространяется тяготение (включая солнце и его систему), ибо тяготение есть свойство материи, зависящее от некоторой силы, и именно из этой силы состоит материя. В этом смысле материя не просто взаимно проницаема, но каждый атом простирается, так сказать, на всю солнечную систему, сохраняя однако свой центр сил»<sup>1</sup>.

Именно динамические определения характеризуют материальную среду, поэтому Фарадей скептически относится к традиционным механическим концепциям эфира. Если атомы представляют собой лишь центры сил, окончания силовых трубок в непрерывной материальной среде, то нет никаких оснований, чтобы противопоставлять обычную материю и эфир. Обычной материи свойственны, в отличие от эфира, тяжесть и твердость. Но это, говорит Фарадей, чисто динамические определения. Тяжесть — это притяжение, а твердость — отталкивание. Поэтому, если эфир состоит из материальных силовых линий, то от него не отличается и обычная материя.

Изложенная в цитированных работах идея Фарадея была одним из самых колоссальных по своему значению и широте новаторских моментов истории научной мысли.

В этой идее заключалось уже и решение коллизии динамического и кинетического представления о веществе и его движении, и новый аспект трактовки абсолютного и относительного движения, и, более того, радикальный переход от механической картины мира к более широкому и точному представлению о природе. Конечно, все это содержалось в теории Фарадея лишь в самой общей и

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 403.

первоначальной форме. Но дело было сделано, и последующее ограничение механических концепций неизбежно принимало форму развития фарадеевых идей.

Физика Декарта изгнала из картины мира качественные предикаты материи, присвоив последней лишь кинетические свойства. Это привело к геометризации мира. Разграничение пространства и вещества требовало динамических предикатов вещества. Ценой отказа от абсолютного кинетизма Декарта атомисты построили кинетическую картину частиц, движущихся в пустоте, обладающих в отличие от пустоты непроницаемостью, инертной массой, тяжестью, электрическим зарядом, магнитными свойствами, являющихся центрами сил и действующих друг на друга посредством этих сил.

Ранее, в очерках, посвященных принципу относительности и принципу наименьшего действия, говорилось о дальнейшем развитии коллизии динамизма и кинетизма. Для одного вида взаимодействий — гравитационных — удалось исключить динамические характеристики материи, приравняв тяготение к искривлению пространства — времени. Это было далеко от картезианской программы, так как речь шла о пространстве, неразрывно связанном со временем. Вообще противоречие между картезианским кинетизмом и ньютоновым динамизмом оказалось в данном случае преодоленным. Попытки геометризации других полей, кроме гравитационных, не привели к положительным результатам. Но возможность полевой теории вещества не устранена. Мы можем представить себе частицы вещества в виде сингулярных областей поля. Поэтому так актуальна сейчас теория Фарадея, которую можно высказать в терминах учения о кривизне пространства и времени.

Фарадей отождествил силовое поле (то, что сейчас, в случае гравитационного поля, мы отождествляем с кривизной пространственно-временного континуума) с веществом. Это было совершенно новым ответом на вопрос о веществе и силе. Лейбниц объявил силу нематериальной субстанцией. Ряд сторонников динамизма хотел заменить материальные атомы нематериальными силовыми центрами и, таким образом, освободить от материальной субстанции научную картину мира. Противники Лейбница и Босковича строили кинетические модели силовых взаи-

модействий. Но никто до Фарадея не говорил о материальности сил, не предполагал, что силовое поле — это не результат механических перемещений, не формальная схема, не проявление свойств монад и т. д., что оно само по себе является материальной субстанцией. Фарадей не «дематериализует» картину мира, а наоборот, определяет силовое поле как материальную субстанцию — единственную объективную реальность.

Высказанная Фарадеем идея материальности силовых полей могла стать однозначным и непререкаемым выводом из экспериментальных данных после длительного развития электродинамики и оптики. Прежде всего нужно было доказать, что нет никакой среды, передающей взаимодействие и отличающейся от самого материального, реального, силового поля, что нет никакого особого вещества, отличающегося от силовых трубок, вещества, обладающего механическими свойствами и передающего тяготение, свет, электрические и магнитные действия. Именно такая среда фигурировала, в частности, в оптике. Свет считали механическими колебаниями эфира. Поэтому Фарадей хотел построить и экспериментально обосновать новую оптику, в которой бы свет рассматривался как колебания силового поля.

Теория светового эфира в период, непосредственно предшествовавший работам Фарадея, была преобразована великими открытиями Юнга и Френеля. В 1800 г. Юнг в трактате об оптике возродил теорию света Гюйгенса, выступив против идеи истечения, господствовавшей в течение всего XVIII столетия. Для истории учения об эфире очень важен тот факт, что Юнг пользовался аргументами, заимствованными из теории электричества. Оптические явления были недостаточным доказательством существования эфира, его гравитационная функция осталась недоказанной. Поэтому существование эфира требовало аргументов, опирающихся на новые явления, — электрические. Уже в XVIII в. велась разработка теории электричества как особой формы движения эфира. Юнг пользуется аргументами Эйлера в защиту эфира, изложенными в работах о природе электричества.

В своей ранней работе «Опыты и проблемы, относящиеся к звуку и свету» (1800 г.) Юнг стремился объяснить оптические явления по аналогии с акустическими,

причем он ссылается на ранних провозвестников механической теории тепла. Основным аргументом Юнга против теории истечения была одинаковая скорость распространения света в пустоте и явление отражения части лучей и проникновения другой части в более прозрачную среду. Эти процессы можно было легко объяснить различной плотностью эфира. Преимуществом такого объяснения служит его кинетический характер. Юнг подтверждает историческую связь между кинетическими теориями света и кинетической теорией теплоты, ссылаясь на работы Румфорта как доказательство волновой теории света, как аргумент против теории истечения.

В своей борьбе против ньютоновой корпускулярной теории Юнг хочет опереться на самого Ньютона. Ньютон, в глазах наиболее догматических своих приверженцев, был не только объявлен богом, но и начинал играть в науке роль, сходную с той, какую играл теологический авторитет в XVII в. Если в XVII столетии противники теологии вынуждены были облекать свои рассуждения в теологическую форму, то в XIX в. Юнгу пришлось нападать на корпускулярную теорию света, придавая своим рассуждениям характер истолкования отрывков ньютоновской «Оптики». Дело облегчалось наличием волновых идей у самого создателя корпускулярной теории света.

Историческая заслуга Юнга и Френеля — развитие волновой теории на основе явлений интерференции. Интерференция, как это знали еще во времена Гримальди и Гюйгенса, заключается в том, что при наложении света на свет мы получаем в некоторых пунктах темноту. Действительно, если экран освещать из двух источников, на нем появятся темные контуры. Здесь свет уничтожается. Но взаимно уничтожить друг друга могут, конечно, не частицы, а лишь движения, направленные в противоположные стороны. В волновом процессе мы можем наблюдать, как при сложении двух волн в тех местах, где амплитуды колебаний совпадают и где гребень попадает на гребень, а впадина на впадину, — в этих местах колебания складываются; там же, где гребень одной волны попадает на впадину другой, т. е. где колебания направлены в противоположные стороны, импульсы взаимно уничтожают друг друга и образуются в случае световых колебаний темные полосы.

Френель развил это представление об интерференции. Он объяснял интерференцию сложением волн, исходящих из различных точек светящейся поверхности. Опираясь на старый принцип Гюйгенса, согласно которому каждая точка эфира, где происходят световые колебания, служит началом новой световой волны, распространяющейся во все стороны, Френель математически вывел все явления дифракции и интерференции из предположения о световых волнах. Точное совпадение теоретических вычислений с результатами экспериментов показывало, что интерференция имеет вполне закономерный и объективный характер. Сторонники теории истечения, не имея возможности истолковать интерференцию с своей точки зрения, объясняли ее в это время субъективным результатом физиологических процессов в сетчатке. Вычисления и опыты Френеля опровергли эту мысль.

Одержав победу над враждебной концепцией, волновая теория света столкнулась с серьезной внутренней трудностью — вопросом о характере световых колебаний. Происходят ли эти колебания вдоль движения волны, как это имеет место при распространении звука, или, напротив, свет — это поперечные колебания эфира вроде волны на поверхности моря. Если бы волны оказались продольными, это открыло бы широкие возможности для механических теорий эфира, построенных по аналогии с механикой газов. Механическая картина поперечных колебаний была бы гораздо сложнее. Для решения вопроса о характере колебаний эфира решающее значение имело открытие поляризации света. Френель дал полную, объясняющую все наблюдавшиеся явления, теорию поляризации, исходя из гипотезы поперечных колебаний. Но эта гипотеза затруднила построение механических моделей эфира.

Учение об эфире всегда было тяжелой областью механического естествознания. По выражению Планка, эфир — «дитя механической теории, поистине зачатое в скорби». Механическая картина мира не может обойтись без эфира, и в то же время она не может надеть рожденный ею эфир непротиворечивыми свойствами. Прежде всего очень трудно было применить к эфиру представление о плотности. Гюйгенс думал, что свет — это продольные колебания. Такие колебания могут происходить и в очень разреженном газе. Поперечные колебания исключают «газо-

образный» эфир: они могут иметь место лишь в твердом теле. Отсюда представление об эфире как о чрезвычайно твердом веществе, которое не оказывает, однако, заметного препятствия прохождению небесных тел.

Ряд физиков пытался обойти противоречие между твердостью эфира и беспрепятственным движением планет. В 1845 г. Стокс указал на относительность понятия твердости тел. Эфир может быть чрезвычайно твердым телом в качестве носителя световых колебаний и в то же время не оказывать заметного сопротивления планетам. Стокс сравнивает движение планет в эфире с медленным погружением в смолу или сургуч. Если груз в течение длительного срока лежит на твердом куске смолы или сургуча, он постепенно погружается в смолу или сургуч, как в жидкость. Между тем в случае удара смола и сургуч при низкой температуре ведут себя как твердые тела и раскалываются. Таким образом, твердость тела зависит от того, насколько быстро изменяется во времени деформирующая сила. Различие между скоростью световых колебаний и движением планет гораздо большее, чем между ударом и погружением в упомянутом примере. Поэтому эфир может вести себя как чрезвычайно твердое тело в отношении быстрых импульсов, какими являются световые колебания и в то же время как вещество чрезвычайно малой плотности по отношению к планетам.

Теория Стокса не могла все же удовлетворительно разрешить противоречия механической теории эфира. В твердых телах волны бывают не только поперечными, но и продольными. В случае распространения света продольные колебания не наблюдаются. Из большого числа гипотез, выдвинутых для того чтобы избежать противоречий, ни одна не удержалась в науке. В течение XIX в. физическая интерпретация теории Френеля часто менялась; и здесь ни одна концепция не могла претендовать на бесспорность, или хотя бы на непротиворечивое объяснение основных фактов. Бесспорным оставался математический скелет волновой теории. Какие бы деформации не приписывались эфиру, какой бы вид не приобретал самый эфир, непоколебленным оставалось утверждение, что процесс распространения света может быть описан простой тригонометрической функцией. Однако кривую этой функции (синусоиду) нельзя считать такой же ре-

альной пространственной моделью, какой она является для волн на поверхности воды.

В XIX в. одним из главных вопросов физики эфира был вопрос, может ли эфир служить телом отсчета для механического движения, может ли он служить неподвижной средой, материальным, физическим представителем абсолютного пространства или он увлекается движущимися телами. Вопрос мог быть решен сравнением скорости света в неподвижных и движущихся средах.

В этих исследованиях пользовались самыми различными методами. О скорости света в движущихся средах судили по результатам астрономических наблюдений, а затем пробовали установить изменение скорости света, рассматривая частоту колебаний, которая зависит от движения среды и в то же время легко обнаруживается, так как частоте соответствует определенная цветная линия спектра. В 1842 г. Христиан Допплер установил зависимость частоты света от движений источника света и наблюдателя. Зависимость между частотой колебаний и движением их источника известна в акустике. На железной дороге по тону свистка можно определить, приближается паровоз или удаляется. Свисток паровоза выше при его приближении и ниже, когда паровоз удаляется. Если наблюдатель приближается к источнику звука или удаляется от него, то получается тот же самый эффект. Гребни звуковых волн чаще проходят через точку, где находится наблюдатель, если эта точка движется навстречу звуку; число звуковых волн, воспринимаемых наблюдателем в единицу времени, становится больше, частота звука — выше. Аналогичным образом световые волны чаще проходят через данную точку, если источник света приближается к ней, и реже — если они удаляются один от другого. В первом случае колебания чаще; частота света смещается к фиолетовому концу спектра, во втором — к красному. Спектральный анализ с большой точностью позволяет обнаружить изменение частоты световых колебаний при движении источника света и наблюдателя. Спектры звезд включают те же цветные линии, что и земные источники света, поскольку раскаленное вещество отдаленных небесных тел состоит из тех же элементов, что и Земля. Но при точном исследовании спектров обнаруживается, что спектральные линии звезд несколько

сдвинуты по сравнению с соответствующими линиями спектров земных источников света. В течение половины года все спектральные линии звезд сдвинуты в сторону фиолетового конца спектров, т. е. в сторону более частых колебаний; в следующую половину года они сдвинуты ближе к красному концу спектра, т. е. в сторону более медленных колебаний. Эти сдвиги спектральных линий представляют собой эффект Доплера, вызванный движением Земли вокруг Солнца. В течение половины своего годового обращения Земля приближается к некоторой звезде, а во вторую половину года отдаляется от нее. Конечно, этим не исчерпываются сдвиги в звездных спектрах по сравнению с земным источником света. Неподвижные звезды в действительности передвигаются и могут отдаляться или приближаться к нашей планете. Однако это смещение не имеет годовой периодичности. Впоследствии эффект Доплера наблюдался и при движении земных источников света: Белопольский в 1895 г. и Голицын в 1907 г. изучали его с помощью движущихся зеркал.

Эффект Доплера легко демонстрирует взаимное передвижение источника света и наблюдателя (например, приближение наблюдателя к источнику света или, наоборот, приближение источника света к наблюдателю). Но может ли эта зависимость доказать абсолютный характер движения наблюдателя и источника света, т. е. движение их обоих в окружающей среде? Если эффект Доплера при совместном движении источника света и наблюдателя исчезает, то оптические явления подчинены принципу относительности; в противном случае они дают основу для констатации абсолютного характера движения. Если бы в системе, где источник света и наблюдатель неподвижны, наблюдался эффект Доплера, то можно было бы, не покидая этой системы, утверждать, что она движется, и, таким образом, ее движение демонстрировало бы свой абсолютный характер.

Остается проверить, наблюдается ли эффект Доплера при совместном движении источника света и наблюдателя. Для этого придется воспользоваться не светом звезд, движение которых от нас не зависит, а земными источниками света. Однако теоретические расчеты показывают, что даже в том случае, если бы тела не увлекали эфир с собой и, таким образом, движение их относительно эфира могло

бы проявиться в оптических явлениях, то смещение спектральных линий, соответствующее эффекту Доплера, было бы чрезвычайно небольшим, ускользающим от наблюдения. Как можно заставить наблюдателя и источник света совместно двигаться с большой скоростью, сопоставимой со скоростью света? Природа дала нам возможность воспользоваться чрезвычайно быстрым движением, именно — движением Земли. Точка на земной поверхности, благодаря вращению Земли вокруг оси, движется со скоростью, превышающей скорость любого вида транспорта. Еще быстрее движется каждая точка земной поверхности, участвуя в годовом обращении Земли вокруг Солнца. Но по сравнению со скоростью света скорость движения Земли вокруг Солнца невелика. Величины, зависящие от отношения скорости тела к скорости света, называются величинами первого порядка. Большинство наблюдаемых оптических явлений, связанных с движением материальных тел, зависит не от этих величин, а от гораздо меньших, связанных с квадратом отношения скорости движущихся тел к скорости света. Если мы пользуемся космическим движением, например движением Земли вокруг Солнца, то квадрат отношения этой скорости к скорости света будет равен приблизительно 0,00000001. Величины, пропорциональные квадрату указанного отношения, называются величинами второго порядка. Если мы будем сравнивать скорость света в системе движущейся навстречу лучу, со скоростью света в неподвижных системах, то мы сможем в большинстве случаев получить величины второго порядка. Наиболее простой способ — воспользоваться земным источником света и сравнить скорости его лучей вдоль движения Земли и поперек этого движения. В первом случае луч идет навстречу движению системы или догоняет ее; во втором случае не происходит сложения или вычитания скорости Земли и скорости света. При измерении скорости света от земных источников, в направлении движения Земли, наблюдают среднюю скорость распространения электромагнитных колебаний в прямом и обратном направлении. Световой луч пробегает некоторое расстояние, а затем возвращается обратно. Скорость этого движения может зависеть или не зависеть от движения среды, в данном случае — от движения Земли. Если движение сказывается на скорости распространения

света, отклонение окажется величиной второго порядка. Это можно показать простым расчетом. Если свет пробегает сначала в прямом, а затем в обратном направлении некоторое расстояние  $x$  между двумя точками земной поверхности сначала в прямом, а затем в обратном направлении света в направлении движения Земли, равно  $\frac{x}{c-v}$ , а в обратном направлении  $\frac{x}{c+v}$  (где  $c$  — скорость света, а  $v$  — скорость движения Земли). Сложив эти две величины, мы получим время, необходимое для распространения света в прямом и обратном направлениях между двумя точками земной поверхности. Оно равно

$$\frac{2xc}{c^2 - v^2}.$$

Чтобы получить среднюю скорость распространения света туда и обратно вдоль движения Земли, нужно пройденный путь, равный  $2x$ , разделить на найденное только что время распространения света. Тогда мы получим среднюю скорость, равную:

$$c \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right).$$

Эта средняя скорость зависит от квадрата отношения  $v/c$ , т. е. от величины второго порядка. На такую ничтожную величину и изменяется скорость распространения света вдоль движения Земли, если Земля не увлекает с собой эфир. Были попытки экспериментально обнаружить величины первого порядка. Они основаны на астрономических наблюдениях.

Араго пытался обнаружить движение Земли относительно эфира, сравнивая преломление света неподвижных звезд в линзах телескопа при приближении Земли к этим звездам и при ее удалении от них. Когда Земля в своем годовом обращении вокруг Солнца приближается к звезде, то скорость света относительно движущейся ему навстречу Земли должна возрасти; а так как преломление света в стекле зависит от его скорости, то Араго был вправе ожидать, что в этом случае фокус линзы несколько сместится. При удалении Земли от той же звезды, т. е.

шесть месяцев спустя, скорость света относительно Земли должна уменьшиться, и фокус линзы сместится в противоположном направлении. Здесь с постоянной скоростью света сравнивалась бы не средняя скорость прямого и обратного движения, а скорость света в одном направлении. Поэтому в результате могла быть получена величина первого порядка. Разность между постоянной скоростью света, т. е. его скоростью в покоящемся эфире и скоростью относительно Земли, была бы равна в каждом случае скорости Земли, а измеряемая таким образом разница между двумя скоростями света была бы равна удвоенной скорости Земли. Отношение этой величины к постоянной скорости света представляет собой величину первого порядка. Однако наблюдения Араго не обнаружили периодических смещений фокуса астрономических линз.

В 1879 г. Максвелл высказал мысль о возможности установить движение Земли и всей солнечной системы относительно эфира с помощью наблюдения затмений спутников Юпитера. Солнце движется вместе со всей солнечной системой в некотором направлении. Когда Юпитер оказывается впереди Солнца на этом пути, то он в течение земного года сравнительно мало изменит это положение, так как обращение Юпитера вокруг Солнца происходит в течение двенадцати земных лет. За год Юпитер сдвинется всего на  $30^\circ$ , т. е. в общем останется впереди Солнца в его космическом движении. Между тем Земля в течение этого года совершит полный круг, и, таким образом, в течение года можно, как это делал Рёмер, найти разницу между промежутками времени, необходимыми свету, чтобы пройти расстояния до Земли, отличающиеся на величину диаметра земной орбиты. Шесть лет спустя Юпитер окажется позади Солнца в его космическом движении. Тогда можно вновь определить опережение и запаздывание затмений его медичейских лун. Если солнечная система в своем космическом движении не увлекает с собой эфир, то можно определить ее движение относительно эфира, сравнивая величины, полученные в первом и во втором случаях. При первом наблюдении Юпитер со своими спутниками находился впереди солнечной системы; таким образом свет распространялся навстречу космическому движению и скорость его должна была равняться скорости света в эфире плюс скорость солнечной системы относительно

эфира. Во втором случае скорость света относительно солнечной системы должна была равняться разности этих скоростей. Однако весь этот расчет доказывал бы абсолютное движение солнечной системы лишь в том случае, если бы астрономические наблюдения установили периодическую разницу в запаздываниях затмений спутников Юпитера при наблюдении через шесть лет. В действительности астрономические наблюдения не обнаруживают таких периодических изменений. Следовательно, наблюдение запаздываний затмений спутников Юпитера не дает никаких доказательств абсолютного движения солнечной системы.

Теория Френеля утверждала, что эфир частично увлекается движущимися телами. Сам Френель исходил при этом из определенных представлений о строении эфира. Плотность его в мировом пространстве равна некоторой постоянной величине. Плотность эфира, находящегося в материальных телах, иная. При движении материального тела эфир, расположенный впереди тела, входит в это тело и приобретает в нем новую, более высокую плотность. Этот уплотненный эфир будет двигаться относительно тела с иной скоростью. Между плотностью эфира в телах и его скоростью существует некоторое определенное соотношение. Френель нашел, что показатель преломления, иначе говоря, — отношение скорости света в пустоте к скорости его распространения в материальном теле, всегда равно квадратному корню из величины уплотнения эфира в теле, т. е. из отношения плотности эфира в теле к плотности свободного мирового эфира. Таким образом, Френель дал механическое истолкование коэффициенту увлечения: этот коэффициент соответствует уплотнению эфира в телах.

Неудачи попыток обнаружить движение тел относительно эфира толкали к другой гипотезе, к гипотезе полного увлечения эфира. В 1845 г. Стокс предположил, что эфир полностью участвует в движении материальных тел. Отсюда вытекает принцип относительности оптических явлений. Оптические явления в движущейся среде, например на поверхности Земли, происходят таким же образом, как и в неподвижных средах. Стоксу пришлось разработать сложную гипотезу эфира, чтобы объяснить неподвижность эфира в мировом пространстве и его дви-

жение в телах. Эта концепция, как бы то доказано впоследствии, противоречила основным законам механики. Вместе с тем появились эксперименты, доказывающие, что эфир лишь частично увлекается движущимися телами.

В 1851 г. Физо сконструировал интерферометр, где оба луча проходили через трубу, по которой протекала вода, причем один луч двигался навстречу воде, а другой догонял ее течение. Если бы вода увлекала с собой эфир, то получился бы определенный сдвиг интерференционных полос. Некоторый сдвиг действительно наблюдался, но он не соответствовал гипотезе полного увлечения. Вычислив коэффициент увлечения, соответствующий наблюдаемому сдвигу, Физо пришел к значению, которое соответствовало формуле увлечения Френеля.

Таким образом, эфир выпадал из механической картины мира: он не мог служить абсолютным телом отсчета для других тел и в то же время эксперимент опроверг гипотезу полного увлечения. В господствовавших в физике XIX в. теориях эфира отсутствие эфирного ветра — невозможность оптического доказательства абсолютного движения, иначе говоря, оптический принцип относительности рассматривался отнюдь не как фундаментальный принцип. Напротив, в отсутствии эфирного ветра видели лишь результат нейтрализации изменений скорости света при движениях в противоположные стороны, в результате которой отклонения становятся пропорциональными квадрату отношения скорости тела к скорости света. Иначе говоря, теория эфира объясняла отсутствие эфирного ветра тем обстоятельством, что отклонения в скорости могут быть продемонстрированы лишь в эффектах второго порядка. Теория Френеля из частичного увлечения эфира делала вывод, что в эффектах первого порядка эфирный ветер может не наблюдаться, что изменения скорости света в движущихся средах не достигают величин первого порядка. Правда, существовал один факт, в котором эфирный ветер не обнаруживался, хотя из теории частичного увлечения следовало, что здесь отклонения достигают величин первого порядка. Речь идет о максвелловом запаздывании затмений спутников Юпитера. Однако этот факт был изолированным и исторически не мог послужить основой для отказа от теории Френеля.

Тем не менее он был чрезвычайно зловещим для механической картины мира, причем не только для ньютоновых концепций дальнего действия, а для механической концепции в целом. Эфир обнаруживал свойства, не соответствовавшие классической механике.

С точки зрения механической теории эфира его можно рассматривать как тело, обладающее инерцией. Следовательно, эфир, предоставленный самому себе, не приобретает ускорения, и в некоторой инерциальной системе он будет неподвижен. Если приложить к эфиру силу, он приобретет ускорение, пропорциональное этой силе. Ускорение инвариантно по отношению к переходу в другую координатную систему. В отношении ускорения все инерциальные системы равноправны, и таким образом эфир подчиняется принципу относительности ньютоновой механики. Но отсюда следует, что эфир подчиняется и классическому правилу сложения скоростей. Если ускорения и силы инвариантны при переходе от одной инерциальной системы к другой, то скорости меняются; распространение света, как и движение тел, будут иметь различные скорости в различных движущихся относительно друг друга инерциальных системах. Опыт показал иное — инвариантность скорости света при переходе от одной из таких систем к другой. Из такой инвариантности следует, что оптические явления не могут обнаружить движение системы относительно эфира, что эфир не может служить абсолютным телом отсчета. В этом и состоит оптический принцип относительности. Он в корне отличается от принципа относительности классической механики: в последней речь идет об инвариантности ускорений, а оптический принцип относительности устанавливает инвариантность скорости света — независимость ее от движения системы, включающей источник света и наблюдателя, иначе говоря, — лучеиспускающие и поглощающие тела.

Так наметился конфликт между механическим и оптическим релятивизмом. Он нашел свое разрешение позже, в XX в., но еще до этого он превратился в конфликт между механикой и электродинамикой. Мы видели, что электродинамика уже в теории Вебера посягнула на независимость сил от движения. Теперь оптика в результате всех опытов измерения скорости света в движущихся средах вступила в противоречие с классическими закона-

ми движения. Этот конфликт приобрел новую форму после того как Максвелл объединил оптику и электродинамику в единой теории.

Остановимся на исторических причинах появления и распространения новой теории. Она и была теорией близкодействия, однозначно вытекавшей из количественных соотношений, многократно подтвержденных впоследствии экспериментом.

Идея реальных силовых линий позволила Фарадею дать рациональное объяснение всем известным в то время фактам. Но она не была, как мы уже говорили, единственно возможным объяснением. Идея дальнего действия также могла дать непротиворечивое истолкование фактов. Фарадей не всегда это понимал<sup>1</sup>. Он думал, что распространение индукции от точки к точке по кривым линиям служит непререкаемым аргументом против дальнего действия. В действительности решающие эксперименты, результаты которых вступили в противоречие с дальним действием, были сделаны значительно позже. Когда электродинамика середины века в лице Максвелла остановилась на распутии, перед ней еще не было *experimentum crucis*, показывающего единственно правильную дорогу. Выбор, однако, был сделан. Как уже говорилось, причины, определившие выбор у Максвелла, так же как и у Фарадея, не сводились к логическому анализу экспериментальных фактов, они включали мощные воздействия, которые смежные отрасли физики оказывали на электродинамику. В пользу дальнего действия на чашу весов был брошен еще непоколебленный авторитет ньютоновой механики. Идея близкодействия в электродинамике имела, помимо общих принципов, лежавших в основе мировоззрения Фарадея, дополнительные аргументы. За истекшее время в сознание физиков вошли некоторые результаты, достигнутые теорией теплоты, некоторые новые аналогии и математические приемы.

Это направление не приобрело еще такого авторитета, какой имели основы ньютоновой механики; но оно уже

---

<sup>1</sup> См. Т. П. Кравец, М. Фарадей и его «Экспериментальные работы по электричеству». Вводная статья к I тому «Экспериментальных работ», изданному в 1947 г. (М. Фарадей. Экспериментальные работы по электричеству. Т. 1. М.-Л., 1947, стр. 763—764).

могло оказывать воздействие на соседние области, выйти за пределы теории теплоты, и в работах ряда творцов электродинамики, в частности у Римана и Максвелла, мы встречаем очень характерные ссылки на дифференциальные уравнения теплопроводности. Самое важное с исторической точки зрения — тесная связь идеи близкодействия в теории упругости и в теории теплопередачи с новыми научно-техническими тенденциями, связанными в последнем счете с промышленной техникой, выросшей на основе применения пара. Этим идеям принадлежало будущее не только там, где они появились, но и в других областях физики. Максвелл, отражая в своем творчестве очень широкие исторические воздействия, перенес войну, объявленную дальноедействию Фарадеем, на такое поле боя, где идея дальногодействия одерживала самые крупные успехи,— в область математической разработки физических проблем. Для этого ему, как и в свое время Фурье, пришлось продвинуть вперед и самые математические методы физики.

Перейдем же теперь к собственно историческим корням работ Максвелла.

Последовательный ряд открытий и обобщений, предшествовавших электродинамике Максвелла, не объясняет еще, почему и под влиянием каких именно реальных исторических сил наука переходила от одной концепции к другой, и тем более не объясняет, почему она перешла от перечисленных концепций к новой, связанной с именем Максвелла. Идеинные предпосылки электродинамики Максвелла сами по себе не объясняют ее генезиса. Собственно исторические корни новой теории можно отчасти увидеть в биографии ее творца.

Уже для ранних научных интересов Максвелла характерно отчетливое стремление к геометрическим методам и кинематическим задачам. Один из учителей Максвелла говорил, что юноша, «по-видимому, положительно не может неправильно думать на физические темы; в математическом анализе, однако, он гораздо слабее». Соученик Максвелла, некий Лоусон, в письме к автору биографии Максвелла Кэмпбеллу пишет:

«Я помню, как однажды на лекции наш лектор трижды заполнил черную доску решением одной сложной задачи по стереометрии; едва он успел закончить, как Максвелл задал вопрос: нельзя ли решить эту задачу геометрическим

путем? И показал, как при помощи одной фигуры и нескольких линий немедленно получалось решение»<sup>1</sup>.

По-видимому, стремление к кинематическим и геометрическим методам решения было уже в то время характерным для Максвелла, и можно с большой степенью вероятности предположить, что эти особенности научных интересов стимулировались конструктивно-технологическими впечатлениями. В этом отношении Максвелл был поистине сыном своего времени, времени быстрого перехода от одних конструкций к другим, когда конструктивно-кинематические модели стояли в центре внимания и инженеров и ученых.

В 1850 г. Максвелл поступил в Кембриджский университет и обучался здесь в течение четырех лет, после чего два года вел исследовательскую работу при университете. Это был второй важный этап творческого роста, когда Максвелл, вырвавшись из сравнительно узкого круга эдинбургских впечатлений, жадно впитывал знания, относившиеся к разнообразным областям техники, науки и философии, причем по свидетельству современников и судя по оставшимся от этого времени статьям стремился находить некоторые общие принципы и методы, применимые подчас к далеко отстоящим друг от друга рядам явлений и проблем. Уже здесь появляются наброски метода аналогий, получивших столь значительное применение в максвелловой теории электромагнитного поля.

Первые самостоятельные исследования Максвелла были посвящены теории цветов. Они были основаны на многочисленных экспериментах и включали теорию, близкую к теории трех основных цветов Гельмгольца. В 1855—1856 гг. Максвелл написал первый из основных трудов об электричестве — «О силовых линиях Фарадея»<sup>2</sup>. Здесь отчетливо проявилось стремление изложить закономерности электромагнитного поля не столько при помощи вычислений, сколько с использованием наглядных аналогий, относящихся к кинематике несжимаемых жидкостей.

В 1860—1865 гг. Максвелл занимал кафедру в Лондоне.

---

<sup>1</sup> Campbell and Garnet. Life of James Clerk Maxwell. London, 1884, p. 123.

<sup>2</sup> Русск. пер. в книге: Дж. Кл. Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М., 1954 (в дальнейшем цитируется «Избр. соч.»), стр. 11—88.

Здесь он, наконец, лично познакомился с Фарадеем, принимал участие в организации экспериментальных работ для определения единицы электрического сопротивления, участвовал в комитете, изучавшем метод определения отношений между электростатической и электромагнитной единицами, написал вторую и третью из своих основных работ об электромагнетизме: «О физических линиях сил» (1861—1862)<sup>1</sup> и «Динамическая теория электромагнитного поля» (1864)<sup>2</sup>. В 1865 г. он поселился в своем родовом имении и здесь написал бессмертный «Трактат об электричестве и магнетизме»<sup>3</sup>.

Творческая жизнь Максвелла, его интересы, особенности его метода очень сложными, неявными путями, иногда весьма косвенным образом связаны с характерными особенностями развития производственной техники середины XIX в. Биографические сведения дают лишь самые общие и гипотетические основания, чтобы определить исторические истоки научных обобщений Максвелла. Можно предположить, можно даже в общей форме утверждать, что геометрическая наглядность, физическая содержательность и «конструктивность» работ Максвелла находятся в какой-то связи с атмосферой научно-технических интересов века пара; но более определенная характеристика исторических корней творчества Максвелла должна исходить не столько из особенностей стиля научного творчества, сколько из его содержания, из основных физических идей Максвелла.

Нельзя думать, что электродинамика Максвелла была обобщением развития электротехники. Связь научных идей Максвелла с электротехникой была сравнительно сложной; принципы учения об электромагнитном поле получили широкое применение в сильноточной электротехнике и в особенности в технике переменного тока, начавшей быстро развиваться лет через десять после смерти Максвелла. В конце концов главная идея электродинамики Максвелла — это физическая реальность электромагнитного поля;

---

<sup>1</sup> Phil. Mag. part 1, 21, 161—175, 1861; Part 2, 21, 281—291, 338—348, 1862; Part 3, 23, 12—24, 1862; Part 4, 23, 85—95, 1862. Русск. пер. Избр. соч., стр. 107—198.

<sup>2</sup> Phil. Trans. 45, 459—512, 1865. Русск. пер.: Избр. соч., стр. 251—341.

<sup>3</sup> A Treatise on Electricity and Magnetism, vol. 2, London, 1873. В избр. соч., перевод предисловия и глав I, III—XI и XIX—XXIII четвертой части (стр. 345—630).

главный аргумент в пользу этой идеи — электромагнитные волны. Последние же получили техническую осязаемость, стали элементом электротехники лишь с открытием Попова. Электротехника, с которой был знаком Максвелл, — это слаботочная электротехника (телеграф) и первые магнито-электрические машины. В «Трактате об электричестве и магнетизме» Максвелл говорит о значении телеграфа для электрофизики.

«Важные применения электромагнетизма к телеграфии также повлияли на чистую науку, придав коммерческую цену точным электрическим измерениям и дав изучающим электричество возможность использования аппаратов в таких масштабах, которые значительно превосходят возможности обыкновенной лаборатории. Следствия этого спроса на познания в области электричества и экспериментальных возможностей их приобретения уже были весьма большими как в стимулировании энергии передовых работающих в области электричества ученых, так и в распространении среди людей практики такой степени точного знания, которое имеет шансы повести к общему научному прогрессу всей инженерной профессии»<sup>1</sup>.

Телеграф и появившееся почти на полвека позже электрическое освещение — это такие области техники, которые связаны с последствиями технического переворота, произведенного паром. Здесь электричество еще не входит в энергетическую базу производства: телеграф с физической стороны основан на движении энергии вдоль проводника, но производственным содержанием телеграфа служит не передача энергии, а передача сигналов. В это время приобретают большое значение точные измерения в области электричества; но количественные закономерности преобразования энергии еще не стоят в центре внимания конструкторов электрических и электромагнитных приборов. То же можно сказать и о конструировании первых динамомашии, предназначенных для гальванопластики и электрического освещения.

Максвеллу принадлежит важная с исторической стороны работа по теории электрических машин. Такая теория развивалась со времени Ленца и Якоби. Якоби был пионером более прикладного направления; физические схемы он

---

<sup>1</sup> Избр. соч., стр. 347—348.

воспринимал как первоначальные эскизы машин. Для Ленца же, напротив, машины были как бы моделями, демонстрировавшими физические принципы. К подобному направлению примыкала и работа Максвелла «О теории поддержания электрических токов механическим путем без применения постоянных магнитов» — доклад, представленный Максвеллом Королевскому обществу в марте 1867 г., через месяц после сообщения Сименса и Уитстона о машинах с самовозбуждением<sup>1</sup>.

В этом докладе Максвелл впервые ввел в теорию электрических машин понятие о постоянной времени в цепях электрических машин. С исторической стороны, со стороны характеристики творческого пути Максвелла и корней его электродинамики доклад о машинах с самовозбуждением интересен не только своим положительным содержанием, но и характерным разрывом между широтой уже сформулированных в это время электродинамических идей Максвелла и сравнительно узким кругом технических проблем, к которым тогда могла быть применена новая теория электромагнитного поля. Новые представления об энергии электромагнитного поля, ее локализации и движении не могли получить широкого практического применения и опоры в практической электротехнике пятидесятых—семидесятых годов прошлого века. В это время историческим истоком выдвигения на первый план проблемы энергии был переворот, произведенный паром, со всем комплексом производственно-технических, экономических и культурных результатов этого переворота, включая применение электричества вне энергетического хозяйства.

Много позже выхода трудов Максвелла, когда появилась разработанная теория электрических машин, когда стал известен принцип вращающихся полей и в особенности когда были получены и практически применены электромагнитные волны, электротехника стала источником мощных импульсов, толкнувших вперед классическую электродинамику.

В статье «О фарадеевых силовых линиях» Максвелл говорит о методе своих исследований в области электромагнетизма. В этой области нужен «такой метод исследования,

---

<sup>1</sup> Proc. Roy. Soc., 15, 397—402, 1868; Phil. Mag., 33, 474—478, 1867.

который на каждом шагу основывался бы на ясных физических представлениях»<sup>1</sup>.

Уже здесь метод Максвелла характеризуется двумя фундаментальными особенностями: 1) математический анализ сливается с физическим, так как математические абстракции все время сохраняют физический смысл; 2) физический смысл математических абстракций состоит не в отождествлении исследуемых физических процессов с механическими моделями, а в их уподоблении, показывающем и сходство с механическими процессами, и различие. Немеханический характер физического содержания электродинамики становится очевидным, как только Максвелл начинает применять этот метод. Он строит геометрическую модель электрических и магнитных сил, показывающую их направление. Но нужно изобразить также интенсивность этих сил в каждой точке. «Это будет достигнуто, если представлять рассматриваемые кривые не простыми линиями, но трубками с переменным сечением, по которым течет несжимаемая жидкость»<sup>2</sup>.

Что же представляет собой эта несжимаемая жидкость? Максвелл все время повторяет, что это отнюдь не какая-либо гипотетическая электрическая жидкость, что здесь электрические силы лишь уподобляются жидкости. Немеханический характер метода аналогий виден буквально в каждой строке, где Максвелл говорит о них. В той же статье «О фарадеевых силовых линиях» он пишет:

«Субстанции, о которой здесь идет речь, не должно приписывать ни одного свойства действительных жидкостей, кроме способности к движению и сопротивлению сжатию. На эту субстанцию не следует смотреть также, как на гипотетическую жидкость в смысле, который допускался старыми теориями для объяснений явлений. Она представляет собой исключительно совокупность фиктивных свойств, составленную с целью представить некоторые теоремы чистой математики в форме, более наглядной и с большей легкостью применимой к физическим задачам, чем форма, использующая чисто алгебраические символы»<sup>3</sup>.

Чтобы понять смысл аналогии, достаточно вспомнить,

---

<sup>1</sup> Избр. соч., стр. 12.

<sup>2</sup> Там же, стр. 16.

<sup>3</sup> Там же, стр. 18.

что Максвелл приписывает жидкости, фигурирующей в модели, отсутствие инерции при значительном сопротивлении «среды», в которой движется жидкость. Это уже не геометрическая, а механическая модель; но в механике отсутствие инерции у движущихся тел является лишь предельным случаем, когда плотность жидкости уменьшается, а сопротивление среды растет. В полностью механических (гидромеханических) моделях картезианцев предполагалось, что сравниваемые процессы тождественны по своей природе. У Максвелла условный характер сопоставлений отражает убеждение в существовании материальной среды с немеханическими, несводимыми к механике свойствами.

Метод Максвелла в известном смысле противоположен методу Лагранжа. В «Трактате» Максвелл пишет:

«Целью Лагранжа было привести динамику в подчинение анализу. Он начал с выражения элементарных динамических отношений через соответствующие отношения между чисто алгебраическими величинами и от полученных таким образом уравнений вывел свои окончательные уравнения чисто аналитическим путем. Отдельные величины (выражающие реакции между частями системы обусловленные их физическими связями) фигурируют в уравнениях движения частей, образующих систему, и исследования Лагранжа с математической точки зрения представляют собой метод исключения этих величин из окончательных уравнений.

Следуя этому процессу исключения, мысль упражняется лишь в вычислениях и поэтому должна оставаться свободной от вмешательства каких-либо динамических идей. С другой стороны, нашей целью является как раз совершенствование динамических идей. Обращаясь поэтому к работам математиков, мы переводим их результаты с языка анализа на язык динамики так, чтобы наши слова могли вызвать мысленный образ не алгебраического процесса, но какого-либо свойства движущихся тел»<sup>1</sup>.

Математизация физики у Лагранжа и физикализация математики у Максвелла — встречные течения научной мысли. Они представляют две формы одного процесса. Лагранж своими работами, основанными на вариационном принципе, дал такие математические обобщения механи-

---

<sup>1</sup> Избр. соч., стр. 412—413.

ки, которые могли быть применены к немеханическим процессам. Максвелл интерпретировал уравнения Лагранжа, находя при помощи условных аналогий их немеханический физический эквивалент.

Максвелл изложил свой метод в особенно отчетливой форме в связи с проблемой соотношения математики и физики. Это было постоянной темой его размышлений и выступлений. В статье «О математической классификации физических величин» Максвелл говорит о возможности исследовать одними и теми же математическими методами различные по своей природе величины<sup>1</sup>. Негативное предупреждение — единый формализм не означает физического тождества электромагнитных и механических процессов — представляет собой другую сторону позитивного утверждения: физически нетождественные явления можно исследовать при помощи общих математических приемов.

Максвелл развивает мысль о единых математических приемах исследования физически различных процессов. Он приводит множество примеров, которые интересны с исторической стороны, так как обнаруживают истоки идей Максвелла в физике XIX в. Особенно часто Максвелл ссылается на теорию теплоты. Он подчеркивает важность физического анализа для самого развития математики. Для математики крайне важно иметь в виду физическую сущность ее абстракций. Формалистические концепции, неправильные и вредные для прогресса науки, вырастают на почве ее успехов. После значительных успехов арифметизации геометрии «все величины рассматривались одинаковым образом и представлялись при помощи чисел или символов, означающих числа. Таким образом, как только какая-нибудь наука полностью приводилась к математической форме, предполагалось (по крайней мере в мире неспециалистов), что решение проблем этой науки как умственный процесс производится без помощи каких бы то ни было физических идей».

«Мне не приходится говорить, — продолжает Максвелл, — что это неправильно и что при решении физических проблем математикам оказывает большую помощь знание науки, в которой эта проблема встречается.

---

<sup>1</sup> Proc. Lond. Math. Soc., 3, 224—232, 1871. Русск. пер. в книге: Дж. Кл. Максвелл. Речи и статьи. М.—Л., 1940, стр. 46—54.

В то же время я думаю, что для успеха науки как в области открытий, так и в области распространения ее было бы весьма полезно, если бы обращали больше внимания непосредственно на классификацию величин»<sup>1</sup>.

Максвелл говорит о разделении математических величин на скаляры и векторы и сравнивает созданное Гамильтоном исчисление кватернионов с изобретенной Декартом системой координат. Он рисует перспективу и следующего шага в развитии математики, который необходим для анализа новых физических понятий.

«Подобно тому как наши представления о физической науке становятся более жизненными при замене чисто числовых идей картезианской математики геометрическими идеями гамильтоновской математики, так в более высоких науках идеи могли бы получить еще более высокое развитие, если бы их можно было выразить на языке, столь же соответствующем динамике, насколько гамильтоновский соответствует геометрии»<sup>2</sup>.

Максвелл исходит из понятия энергии — этого центрального понятия физики, начиная с середины XIX в., и центрального понятия его работ в области электродинамики и теории газов. Для него это понятие является исходным пунктом не только развития физики, но и углубления и обобщения векторного исчисления. Он предугадывал шаги, сделанные в математике в этом направлении впоследствии. Называя векторы, относимые к единице длины, «силами в обобщенном смысле», а векторы, относимые к единице-площади, «потоками», он пишет: «Операция интегрирования составляющей потока, перпендикулярной к поверхности, для каждого элемента поверхности всегда имеет физический смысл. В некоторых случаях результат интегрирования по замкнутой поверхности не зависит, с некоторыми ограничениями, от положения поверхности. Результат выражает тогда количество некоторого рода вещества, либо существующего внутри поверхности, либо вытекающего из нее, соответственно физической природе потока»<sup>3</sup>.

Максвелл говорит, что открытие веществ, обладающих различными физическими свойствами в различных на-

<sup>1</sup> Там же, стр. 46.

<sup>2</sup> Там же, стр. 46—47.

<sup>3</sup> Там же, стр. 49.

правлениях, позволяет провести различие между «силой» и «потоком» в том смысле, в каком он употребляет эти термины, и является поэтому исходным пунктом важных математических результатов. Максвелл предлагает далее назвать оператор Лапласа  $\nabla^2$  концентрацией величины, к которой применен оператор, и вводит термин «падение» (slope), чтобы обозначить результат применения гамильтонова оператора  $\nabla$  к скалярной функции. «Величина  $\nabla P$  есть вектор, указывающий направление, в котором  $P$  наиболее быстро уменьшается, и измеряющий степень этого уменьшения. Я решаюсь с большой осторожностью называть это падением. Ламе называет величину выражения  $\nabla P$  «первым дифференциальным параметром»  $P$ , но направлением вектора  $\nabla P$  он не интересуется. Нам нужен термин, имеющий векторный характер, который, одновременно указывая направление и величину, в то же время не употреблялся бы еще в другом математическом смысле. Я взял на себя смелость распространить обычный смысл слова «падение», взятого из топографии, где по отношению к трехмерному пространству употребляются лишь две независимые переменные»<sup>1</sup>.

Результатом применения гамильтонова оператора к векторной функции может быть скаляр — Максвелл предлагает назвать его «конвергенцией» (то, что сейчас называется дивергенцией) — либо — вектор «curl». Это краткое изложение и отчасти развитие идей векторного исчисления и векторного анализа было впоследствии повторено в более систематической форме в ввводной части «Трактата об электричестве и магнетизме». Из максвелловских терминов сейчас сохранилось лишь выражение «curl» для вихря (rot).

Теперь нам понятно, почему Максвелл, заявляя, что его метод совпадает с методом Фарадея, говорил о «математическом методе» Фарадея-мыслителя, который не включил ни одной аналитической формулы в свои труды. Максвелл полагал, что некоторые новые методы математики вытекают из физических идей Фарадея. В статье о Фарадее Максвелл говорит, что в сочинениях Фарадея мы не находим дифференциальных и интегральных уравнений, которые многим кажутся подлинной сущностью

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 53.

точной науки<sup>1</sup>. В трудах Пуассона и Ампера, вышедших до Фарадея, и в трудах Вебера и Неймана, появившихся позднее, встречается много формул, которых Фарадей даже не понял бы, и, несмотря на это, можно говорить о математическом методе Фарадея, потому что формулы, примененные перечисленными учеными, это еще не вся математика.

«Геометрия положения представляет собой пример математической науки, созданной без помощи дифференциального и интегрального исчисления. Фарадеевы линии сил занимают в науке об электромагнетизме такое же положение, как пучки линий в геометрии положения. Они позволяют нам воспроизвести точный образ предмета, о котором мы рассуждаем. Способ, которым Фарадей использовал свою идею силовых линий, чтобы координировать явления электромагнитной индукции, доказывает, что он был математиком высокого порядка — одним из тех, у кого математики будущего могут черпать ценные и благотворные методы»<sup>2</sup>.

Сейчас мы знаем и название и содержание математических идей, выросших из нового этапа развития физики, математических идей, адекватных физике близкого действия Фарадея — Максвелла. Наиболее очевидная сторона дела — развитие векторного, а затем тензорного анализа. Но в последнем счете с физикой близкого действия связаны и еще более общие направления математики. Развитие математики переменных отношений во второй половине XIX в. имело корни, в частности, и в физике. Среди них преимущественное значение принадлежало электродинамике близкого действия. Она в конце концов позволила обосновать идею зависимости геометрических свойств пространства от происходящих в нем физических процессов.

Неэвклидова геометрия и мысль о возможности обнаружения отступлений свойств реального пространства от евклидовой геометрии были великим переворотом в науке, они содержали первые указания на возможность физической теории, решающей проблему геометрических свойств макромира и микромира. Риман явным образом исходил из новых физических идей, и его работы не толь-

---

<sup>1</sup> «Nature», 8, 1873; Русск. пер. «Речи и статьи», стр. 71—77.

<sup>2</sup> Там же, стр. 77.

ко логически, но и непосредственно исторически связаны с электродинамикой. Об этом хорошо сказал Дерк Стройк в «Очерке истории дифференциальной геометрии». Он связывает научные идеи Римана со стихийным диалектическим развитием естествознания XIX в., нашедшим генерально глубокое обобщение в «Диалектике природы».

«Риман указывает не только на то, как твердое тело ведет себя в пространстве, но говорит и о том, как действует материальное тело на пространство. Пространство для Монжа не подлежит обсуждению, для Римана же оно скорее объект, который так же подлежит научному изучению, как и сами твердые тела. Начиная с Римана, материалистическая диалектика постепенно вытесняет метафизический материализм в вопросах обоснования геометрии. Пространство действует на тела, тела воздействуют на пространство. При первом наглядном представлении возможна неопределенная концепция пространства; только опыт дает ему свойства, которые делают его пространством нашей геометрии и нашей физики,— проективные свойства, метрические свойства, даже свойства *analysis situs*. От абстрактного пространства Монжа, в котором предполагается, что твердые тела находятся на конечном расстоянии друг от друга, мы приходим к теории пространства, рассматриваемого как «поле», это и делает Риман. Фарадей и Максвелл делают такой же шаг для электрического поля (как замечает Вейль). И в других областях знания были сделаны в то же время подобные шаги в сторону перехода от метафизической классификации, имевшей место в естествознании XVIII в., к современным концепциям. Тот же диалектический метод характеризует работы Лайелля в геологии, Дарвина в биологии. Однако сознательно он был применен Марксом в общественных науках и был развит им в научное мировоззрение «диалектический материализм»<sup>1</sup>.

Мысль, к которой присоединился Стройк, мысль о связи между развитием и интерпретацией идей Лобачевского и Римана, с одной стороны, и физикой близкодействия,— с другой, высказывалась неоднократно. Вейль писал: «В области геометрии совершен тот же шаг, который

---

<sup>1</sup> Д. Стройк. Очерк истории дифференциальной геометрии до XX в. М.—Л., 1941, стр. 54.

Фарадей и Максвелл сделали в области физики, в частности в учении об электричестве, благодаря отказу от принципа действия на расстоянии: при изучении мира мы исходим из взаимоотношений в бесконечно малом...»<sup>1</sup>.

Подлинная физическая интерпретация идей Лобачевского и Римана была дана через полу столетие после появления теории Максвелла; но исторической основой такой интерпретации было развитие и обобщение классической электродинамики. Если же говорить о шестидесятых-семидесятых годах XIX в., то речь идет лишь о некоторых начальных тенденциях, направленных к созданию физической геометрии — теории, в которой все математические абстракции физически содержательны, где каждая стадия математического расчета имеет физический смысл, где каждый математический символ выражает физическое понятие.

Ампер, Нейман, Вебер и другие творцы домаксвелловых математических теорий электромагнетизма придавали физическое значение результатам расчетов, но отнюдь не промежуточным понятиям. Этот метод оказался достаточно плодотворным, но Максвелл продемонстрировал важность для новой теории построений, в которых математический анализ неразрывно связан с физическими моделями. Такой характер максвелловых работ вызвал, по словам Пуанкаре, досаду ученых, привыкших к трудам, написанным в чисто аналитическом духе. Метод Максвелла особенно раздражал французских ученых, находившихся под обаянием трудов, положивших начало аналитической механике. Некоторые нападки на работы Максвелла были продиктованы принципиальным отрицанием содержательности и реальности научных абстракций. Дюэм говорил о «Трактате» Максвелла: «Мы полагали, что вступаем в мирное и упорядоченное жилище дедуктивного разума, а вместо этого оказываемся на каком-то заводе» и заявлял, что «Трактат» Максвелла напрасно облечен в математическую форму, он не является логической системой<sup>2</sup>. Действительно, «Трактат» Максвелла,

---

<sup>1</sup> См. H. Weyl, *Raum, Zeit, Materie*, Berlin, 1923, S. 40.

<sup>2</sup> P. Duhem, *La Théorie physique, son objet et sa structure*. 2 me éd. Paris, 1914, p. 20.

отличающийся, по словам Клейна, «массивной реалистичностью»<sup>1</sup>, противостоит формалистическим традициям.

Максвелл как-то говорил, что каждый физик хорошо сделает, если, перед тем как напишет слова «масса» или соответствующий символ, собственноручно подвесит гирю на веревке и толкнет ее. Это полужутливое замечание, иллюстрирующее предметность физического мышления Максвелла, очень характерно для него, но нужно подчеркнуть: «предметы», характеризующие такую предметность, это не столько перемещающиеся в пространстве тела, сколько материальные объекты немеханического характера. Физики, воспитанные в традициях механического объяснения физических явлений, при чтении «Трактата об электричестве и магнетизме» быстро убеждались, что при всей «массивной реалистичности» книги автора в сущности не интересует, какая именно механическая модель будет привлечена для описания электромагнитного поля. Неоднозначность таких моделей навела подозрение об условности механического объяснения в целом.

Пуанкаре — первый отметил эту, смутно ощущавшуюся и другими неоднозначность механических моделей. Он писал, что «Трактат» Максвелла исключает все утверждения, зависящие от конкретной механической модели, и содержит лишь то, что сохраняется, какова бы ни была механическая модель. Поэтому механические модели приобретают формальный и условный характер, вызывающий внутренний протест у читателя, привыкшего к однозначным механическим моделям, рассматриваемым как собственно физическое и единственно возможное истолкование явлений.

«Все сочинение,— пишет Пуанкаре,— проникнуто одним и тем же духом. Подробно рассматривается только существенное, т. е. общее всем возможным теориям, и почти везде обходится молчанием все, что согласуется лишь с одной частной теорией. Поэтому читатель видит перед собой форму, почти лишенную содержания, и он склонен с первого взгляда принять ее за беглую и неуловимую тень. Это вызывает у читателя усилия и новые

---

<sup>1</sup> F. Klein. Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik in 19 Jahrhundert, Bd. I, Berlin, 1926, S. 242.

размышления, и в конце концов читатель убеждается в ответственности и условности теоретических построений, которые вызвали у него раньше такое восхищение»<sup>1</sup>.

Пуанкаре говорит, что у Максвелла нет механического объяснения электрических явлений: «...он ограничивается доказательством возможности такого объяснения»<sup>2</sup>. В этой связи Пуанкаре подвергает специальному анализу проблему однозначности механического объяснения физических явлений. Механическое объяснение оперирует координатами некоторой системы (быть может, гипотетической, включающей «скрытые движения»), устанавливает дифференциальные уравнения, связывающие эти координаты со временем, переходит от указанных уравнений к уравнениям, связывающим друг с другом наблюдаемые физические явления (изменения некоторых физических параметров). Совпадение вычисленных изменений этих параметров с наблюдаемыми не дает, как показывает Пуанкаре, доказательства однозначности механического объяснения, так как может существовать бесконечное число других механических систем с другими координатами, также дающими результаты, совпадающие с опытом. Чтобы получить уравнения, представляющие механическую схему физических явлений, лучше всего, по мнению Пуанкаре, воспользоваться принципом Гамильтона. Уравнения, связывающие координаты механической системы с временем, включают функцию  $U$  координат, и функцию  $T$  скоростей частиц, входящих в систему. Соответственно, нужно представить  $U$  в качестве функции наблюдаемых параметров, а  $T$  в качестве функции этих параметров и их производных. С помощью принципа Гамильтона можно получить уравнения Лагранжа, в которые входят указанные функции.

«Чтобы механическое объяснение некоторого явления было возможно, необходимо чтобы было возможно найти две функции  $U$  и  $T$ , из которых первая зависит только от опытных параметров  $p$ , а вторая также от производных этих параметров по времени, причем эта вторая функция должна быть однородной в отношении указанных производных (однородна второй степени относительно про-

---

<sup>1</sup> H. Poincaré. *Electricité et Optique*, v. I. Paris, 1890, p. XIV.

<sup>2</sup> Там же, p. VII.

изводных). Необходимо также, чтобы составленные по этим функциям общие лагранжевы дифференциальные уравнения были тождественны уравнениям, выведенным из опыта»<sup>1</sup>.

Неоднозначность механического объяснения используется в работах Пуанкаре для конвенционалистских выводов. Для Пуанкаре механическое объяснение — синоним объективного научного объяснения вообще. Поэтому неоднозначность механического объяснения рассматривается как доказательство условности и субъективности научного объяснения в целом.

В действительности неоднозначность механического объяснения, которая так поразила ученых, воспитанных в традициях Лагранжа и Лапласа, свидетельствовала о переходе к новому типу каузального исследования объективного мира, к более точным представлениям о реальности.

Размышления Пуанкаре о неоднозначности механического объяснения были продолжены в несколько ином духе В. А. Михельсоном в статье «О многообразии механических теорий физических явлений», напечатанной в 1891 г. в «Журнале русского физико-химического общества».

Следуя за Пуанкаре, Михельсон определяет механическую теорию как описание некоторой системы материальных точек с  $k$  координатами  $q_1, q_2, \dots, q_k$ , уравнения движения которой позволяют вывести экспериментально обнаруженные явления. Физическое явление состоит в изменении некоторых величин  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Измеряя эти величины в разное время и в разных условиях, можно получить экспериментальные законы в виде уравнений, содержащих указанные параметры  $p_1, \dots, p_n$  и время. Механическая теория явлений, состоящих в изменении величин  $p_1, \dots, p_n$ , содержит определенные соотношения между всеми  $p$  и всеми  $q$  — координатами указанной выше системы. С помощью этих соотношений можно получить уравнения, совпадающие с экспериментальными законами.

Здесь Михельсон вводит в рассуждения Пуанкаре важный корректив. Пуанкаре предположил, что механи-

<sup>1</sup> Там же, р. XII.

ческая теория явления, состоящего в изменении  $p$ , содержит  $k$  уравнений, т. е. что каждая координата  $q$  может быть представлена в виде функции наблюдаемых параметров  $p$ . Но физические теории XIX в. отнюдь не соответствуют такому требованию. Циклические координаты Гельмгольца и координаты отдельных молекул в термодинамике не связаны с наблюдаемыми изменениями  $p$ .

Михельсон очень глубоко проникает в самую суть механического объяснения явлений в физических теориях XIX в. В предыдущем столетии механические теории однозначным образом связывали друг с другом наблюдаемые величины и координаты материальных точек; во всяком случае такова была принципиальная задача научного объяснения. Термодинамика принесла с собой новый тип научного мышления, она позволяла игнорировать координаты отдельных молекул; более того, она требовала такого игнорирования: необратимость термодинамических циклов могла получить рациональное объяснение только при статистическом подходе к молекулярным движениям. Статистика устраняет из числа рассматриваемых координат  $q_1, q_2, \dots, q_k$ , однозначно связанных с  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , координаты отдельных молекул.

Поэтому Михельсон вводит более широкое требование: механическая теория должна выразить все наблюдаемые параметры  $p_1, p_2, \dots, p_n$  в виде  $n$  функций координат некоторой механической системы. Соответственно, требуется не  $k$ , а только  $n$  уравнений:

$$p_1 = \varphi_1(q, \dot{q}); \dots; p_n = \varphi_n(q, \dot{q}).$$

Вслед за Пуанкаре Михельсон вводит функцию всех координат  $q_1, \dots, q_n$  рассматриваемой механической системы, обозначая эту функцию через  $U(q_1, q_2, \dots, q_n)$ , и некоторую функцию координат и их производных по времени  $T(q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)$ , ( $U$  — потенциальная, а  $T$  — кинетическая энергия системы). Соответственно, можно написать  $k$  уравнений движения Лагранжа:

$$\frac{\partial}{\partial q_i}(U - T) + \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) = \psi_i,$$

где  $\psi_i$  — обобщенная слагающая внешних сил вдоль координаты  $q_i$ . Внешние силы могут быть произвольными,

поэтому  $\psi$  — произвольная функция координат  $q$  и их производных по времени  $\dot{q}$ . Интегрируя написанные выше лагранжевы уравнения, можно получить значения всех  $q$  и  $\dot{q}$ , подставить эти значения в выражения для  $p_1, \dots, p_n$  и сравнить теоретически вычисленную зависимость параметров  $p_1, \dots, p_n$  от координат и времени с экспериментально найденной. Но если внешние силы произвольны и соответственно произвольна их слагающая  $\psi$ , можно при любых функциях  $U$  и  $T$  получить выражения для  $p_1, \dots, p_n$ , совпадающие с экспериментально установленными закономерностями. Таким образом, совпадение уравнений

$$p_1 = \varphi(q, \dot{q}); \dots; p_n = \varphi_n(q, \dot{q})$$

с экспериментальными данными еще не служит доказательством правильности данной механической теории, т. е. теории, в которой фигурирует данная механическая система. Можно перейти к иным системам, с иными  $q$  и  $\dot{q}$  и получить уравнения, подтверждаемые опытом.

Михельсон показывает, что даже в случае изолированной консервативной системы механическое объяснение поведения параметров  $p_1, \dots, p_n$  остается неоднозначным.

Михельсон в основном присоединяется к выводу Пуанкаре: если группа физических явлений может быть удовлетворительно объяснена движением некоторой механической системы, то она может быть объяснена и движением других механических систем, эквивалентных данной. Но Михельсон отчетливее показал, чем именно различаются эквивалентные механические системы.

Как уже говорилось, Пуанкаре в своем изложении теории Максвелла рассматривал неоднозначность механических моделей как некоторую фатальную черту любого научного объяснения. Ему была чужда мысль о неоднозначности максвелловых моделей как об исторической ступени последовательного уточнения картины мира. Несколько ближе к такой оценке метода Максвелла подошел Михельсон. В цитированной статье «О многообразии механических теорий физических явлений» Михельсон пишет о Максвелле:

«При помощи общих теорий динамики, с одной сторо-

ны, и опытных законов электричества и магнетизма,— с другой, он установил ряд теорем, которые должны оказаться справедливыми независимо от того, какую конкретную иллюстрацию этих явлений нам готовит будущее. Трудность вполне ясного понимания некоторых из этих теорем именно и заключается в этой их общности, в том, что, хотя самые теоремы носят чисто динамический характер, тем не менее входящие в них параметры не получили еще конкретного механического определения...».

Михельсон показывает, что неопределенность механического объяснения позволяет расширить круг явлений, которые служат предметом такого объяснения. Термодинамика благодаря неоднозначности механической интерпретации может охватить все физические и химические процессы. Михельсон вспоминает введенное Гельмгольцем деление физических процессов на «стройные» (*georgnete*) и «нестройные» (*ungeorgnete*). К первым относятся движения, при которых скорости отдельных точек системы могут рассматриваться как непрерывные функции координат и времени (гидродинамика, теория упругости, волновая оптика). Ко вторым — движения, при которых соседние частицы могут иметь скорости с конечными разностями (кинетическая теория газов). Михельсон видит, что картину «стройных» движений можно рассматривать как статистическую аппроксимацию микроскопической картины «нестройных» движений. Он допускает, что конкретная и однозначная механическая интерпретация максвелловой электродинамики будет оперировать и «нестройными» движениями.

Эта мысль с исторической точки зрения весьма интересна. Аналогия, навеянная статистической механикой и термодинамикой, позволяет говорить о гипотетической статистической электродинамике, где непрерывные функции координат и времени являются статистическими средними значениями «нестройных» скоростей, которые нельзя рассматривать как функции координат и времени.

По существу же речь идет о статистической континуализации, при которой мы не сомневаемся в существовании элементарных обратимых движений, целиком подчиненных нестатистическим закономерностям механики, и о некоторой континуальной среде, где сомнительно **само**

существование механических смещений, объясняющих наблюдаемые процессы. Михельсон, конечно, не сомневается в том, что так или иначе, в той или иной конкретной интерпретации, электродинамика найдет механическое истолкование. Для него заслуга Максвелла в том, что последний независимо от такого истолкования написал уравнения, справедливые при любой механической интерпретации. Поэтому электродинамика с методологической стороны мало отличается от термодинамики. В термодинамике движения отдельных молекул игнорируются, никто не решает задачи, включающей бесчисленные уравнения движения и начальные условия каждой молекулы. В электродинамике еще большее ограничение интересов, здесь даже неизвестно, какова в качественном смысле механическая система, однозначно объясняющая электромагнитные явления. Об отсутствии всякой механической системы за кулисами электродинамики в девяностые годы, конечно, еще трудно было догадываться. Гениальность Максвелла состоит не только в том, что он написал уравнения, независимые от выбора той или иной из неоднозначных механических интерпретаций, но и в том, что эти уравнения независимы от существования механической интерпретации вообще.

В этом отношении электродинамика подняла на принципиально новый уровень физику в целом. Механика дискретных тел не давала повода ставить вопрос о неоднозначности объяснения наблюдаемых явлений: геоцентрическое объяснение видимых движений Солнца и звезд оказалось неэквивалентным гелиоцентрическому, а в явлениях, происходящих на Земле, вопрос о теле отсчета всегда решался однозначно. Изучение (в последнем счете — применение) молекулярных процессов показало неоднозначность микроскопических механических моделей для макроскопических законов термодинамики. Электродинамика показала, что само существование механической системы за кулисами электрических и магнитных явлений не вытекает из уравнений, связывающих изменения наблюдаемых параметров. Таким образом, признание неоднозначности механического объяснения в электродинамике (в отличие от термодинамики) было непосредственной подготовкой принципиального отказа от механического объяснения.

Впоследствии механические процессы начали объяснять немеханическими моделями. Но это было результатом долгой эволюции идей, в которой электродинамике принадлежала исключительно важная роль.

Действительный исторический смысл метода механических аналогий у Максвелла состоял в том, что устранение механической подосновы электромагнитных явлений из картины мира сопровождалось констатацией реальности иной, немеханической материальной субстанции — самого электромагнитного поля.

Эта идея принадлежала Фарадею, но у Максвелла она приняла новую форму, стала основой теории, приведшей к возможности экспериментально доказать реальность поля. В этой теории электромагнитное поле описывается дифференциальными уравнениями, обобщающими открытия Эрстеда, Ампера и Фарадея: фарадеевский виток с током, возникающим при движении витки относительно магнитного поля, в теории Максвелла стягивается в точку, и мы получаем простой закон, связывающий электрическое поле в данной точке с изменением магнитного поля. Стягивание силовых линий электрического поля в точку дает возможность выразить структуру поля дифференциальными уравнениями в частных производных. Соответственно, обнаруженные Эрстедом магнитные силовые линии также стягиваются в точку, и эта концепция дает возможность выразить зависимость магнитного поля от изменения электрического поля также в форме дифференциального уравнения.

Уравнения Максвелла отнюдь не сводятся к переводу идей Фарадея на язык математики. Они включают нечто новое — фактическую возможность определить изменения поля в пространстве и во времени, если заданы начальные и граничные условия, и с помощью математического анализа получить такие выводы, которые не могли бы быть получены из простой модели силовых трубок с продольным натяжением и боковым распором. Эти выводы допускают экспериментальную проверку и, следовательно, позволяют экспериментально решить вопрос о реальности поля.

Историческое отличие физических идей Фарадея от теории Максвелла — это в значительной степени отличие замысла от исполнения. Оно не уменьшает величия на-

учного подвига Фарадея; напротив, чем больший исторический и логический интервал отделяет исполнение от замысла, тем, очевидно, смелее был замысел. Попытки доказать неэквивалентность объяснений явлений статического, стационарного и квазистационарного поля с точки зрения близкодействия и далекодействия сменились строгой теорией, предсказавшей эксперименты, в объяснении которых близкодействие и далекодействие действительно неэквивалентны. В теории Максвелла основными переменными являются напряженности электрического и магнитного полей. Эти переменные суть функции четырех независимых переменных — трех пространственных координат и времени.

Изменение напряженности электрических и магнитных полей — исходный, основной процесс, который описывается уравнениями Максвелла. Возмущения поля распространяются от точки к точке с конечной скоростью, и его структура дается в форме дифференциальных уравнений в частных производных, уравнений, содержащих частные производные переменных поля по пространственным координатам и по времени.

Как пришел Максвелл к этим уравнениям? Мы предварительно напомним читателю уравнения Максвелла в современной форме, которую они приобрели благодаря трудам Герца.

Законы Био-Савара и Ампера обобщаются уравнением:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j},$$

где,  $\mathbf{H}$  — напряженность магнитного поля,  $\mathbf{j}$  — плотность тока.

Закон электромагнитной индукции выражается уравнением:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

где  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля, а  $\mathbf{B}$  — индукция магнитного поля.

Метод Максвелла — стремление придать физический смысл математическим абстракциям теории поля — принес ему большую победу, когда он обобщил понятие тока и ввел понятие тока смещения, измеряемого производной по времени от индукции электрического поля. Ток смеще-

ния имеет такую же физическую реальность, как и ток проводимости. Максвелл предположил, что токи смещения создают магнитное поле. Соответственно, в первом уравнении Максвелла эти токи прибавляются к току проводимости, и мы получаем

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},$$

(где  $\mathbf{D}$  — индукция электрического поля), откуда можно вывести замкнутость токов, если произвести операцию  $\operatorname{div}$  над обеими частями уравнения и получить таким образом нуль в левой части.

Подчеркнем, что эксперименты Фарадея и вообще все эксперименты, известные Максвеллу, не давали ему права написать это, второе уравнение<sup>1</sup>. Именно в этой гениальной догадке — исходный пункт электромагнитной теории света, волнового уравнения и, следовательно, радикального доказательства близкодействия — картины электромагнитного поля в отсутствии зарядов.

Второе уравнение Максвелла при обобщении понятия тока сохраняет вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

но теперь означает, что при всяком изменении магнитного поля возбуждается электрическое поле и ток смещения в диэлектриках и проводимости в проводниках.

Напомним эти известные формулы — записанный в принятой сейчас форме итог гениального взлета творческой мысли Максвелла, — проследим путь, которым он шел. В «Динамической теории электромагнитного поля», опубликованной в 1864 г., часть III посвящена общим уравнениям электромагнитного поля<sup>2</sup>. Максвелл начинает с определения тока и его составляющих и обозначает через  $p$ ,  $q$  и  $r$  составляющие тока по  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Затем он говорит о составляющих электрического смещения  $f$ ,  $g$  и  $h$ , производные которых должны быть прибавлены к составляющим тока, чтобы получить «общее движение электричества».

<sup>1</sup> См. К. Д. Синельников. Сб. О философских вопросах совр. физики. Киев, 1956, стр. 9.

<sup>2</sup> Избр. соч., стр. 289—301.

Максвелл пишет уравнения:

$$p' = p + \frac{\partial f}{\partial t},$$

$$q' = q + \frac{\partial g}{\partial t},$$

$$r' = r + \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Сейчас эти формулы рассматриваются как определение вектора плотности полного тока.

Далее Максвелл вводит составляющие вектора напряженности электрического поля, который он называет «электродвижущей силой в данной точке». Эти составляющие обозначаются через  $P$ ,  $Q$  и  $R$ . Они равны соответственно разностям потенциалов на единицу длины проводника, помещенного в данной точке по направлениям  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Вслед за этим Максвелл переходит к понятию магнитного потока, пронизывающего контур. Указанный поток называется им «электромагнитным количеством движения контура». Эта величина выводится из «электромагнитного количества движения в точке», составляющие которого  $F$ ,  $G$ ,  $H$  — импульсы электродвижущих сил  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$  равны:

$$F = \int P dt, G = \int Q dt, H = \int R dt,$$

откуда электродвижущие силы, зависящие от изменения магнитного потока, равны:

$$P = -\frac{\partial F}{\partial t}, Q = -\frac{\partial G}{\partial t}, R = -\frac{\partial H}{\partial t}.$$

Если проинтегрировать вдоль контура  $s$  выражение

$$F \frac{\partial x}{\partial s} + G \frac{\partial y}{\partial s} + H \frac{\partial z}{\partial s},$$

то получается «полное электромагнитное количество движения контура». Максвелл указывает на тождество этой величины, т. е. магнитного потока, пронизывающего контур, с тем, что Фарадей называл электротоническим состоянием среды. Дальнейшее звено рассуждений Максвелла — понятия напряженности магнитного поля («магнитная сила») с составляющими  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и коэффициента

магнитной проницаемости  $\mu$  («коэффициент магнитной индукции»). Произведения составляющих напряженности магнитного поля на этот коэффициент равны числу силовых линий, проходящих через единицу площади, перпендикулярной соответственно  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Эти величины (составляющие вектора магнитной индукции) Максвелл вводит в уравнения:

$$\mu\alpha = \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\partial G}{\partial z},$$

$$\mu\beta = \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\partial H}{\partial x},$$

$$\mu\gamma = \frac{\partial G}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial y}.$$

В современной и векторной форме эти соотношения выражаются уравнением, в котором вектор магнитной индукции определяется через вектор-потенциал  $\mathbf{A}$ .

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}.$$

Максвелл переходит к выводу трех скалярных уравнений, которые сейчас в векторной форме называются первым уравнением Максвелла. Сам Максвелл называет их уравнениями токов. Движение магнитного полюса в электромагнитном поле не производит работы, если путь полюса при этом не охватывает тока; поэтому сумма

$$\alpha dx + \beta dy + \gamma dz = d\varphi$$

есть полный дифференциал магнитного потенциала  $\varphi$ . Величина  $\varphi$  — многозначная функция; ее значения, зависящие от числа обходов тока, различаются на величину, соответствующую одному обходу, равную  $4\pi c$ , где  $c$  — сила тока. Если нет токов, то

$$\frac{\partial \gamma}{\partial y} - \frac{d\beta}{dz} = 0 \text{ и т. д.}$$

Когда мы имеем токи  $p'$ ,  $q'$ ,  $z'$ , то в этом случае получаем три искомого уравнения:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial y} - \frac{\partial \beta}{\partial z} = 4\pi p',$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial z} - \frac{\partial \gamma}{\partial x} = 4\pi q',$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} = 4\pi r'.$$

Левые части — составляющие  $\operatorname{rot} \mathbf{H}$ , правые — составляющие величины

$$4\pi \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}.$$

Таким образом, «уравнения токов» представляют собой то, что сейчас называется первым уравнением Максвелла для тока проводимости и тока смещения.

Определяя напряженность электрического поля («электродвижущую силу в контуре»), Максвелл рассматривает движущийся в магнитном поле контур и подсчитывает изменение магнитного потока, вызванного движением и деформацией контура. Не приводя этих выводов, отметим только, что они в основном совпадают с современными<sup>1</sup>.

В «Трактате об электричестве и магнетизме» Максвелл выводит основные уравнения электромагнитного поля иным, более систематическим образом. Нас здесь интересует не самый вывод (мы будем в дальнейшем исходить из уравнений Максвелла в их современной форме), а некоторые иллюстрации методологических принципов Максвелла. В «Трактате» Максвелл начинает с учения о размерностях и с основ векторного исчисления. Затем идут четыре части: электростатика, электрокинематика (постоянный ток), магнетизм, электромагнетизм. В первой главе каждой части описываются исходные эксперименты и вводятся основные понятия. Метод исследования, как и в предыдущих работах, характеризуется синтезом математической характеристики каждой физической величины и физической интерпретации математического символа. Мы приведем строки «Трактата», очень ярко иллюстрирующие обе стороны этого метода. В шестой главе IV части «Трактата» Максвелл говорит о векторе магнитной индукции: «Отъединяя этот вектор, кото-

<sup>1</sup> См. примечания П. С. Кудрявцева и З. А. Цейтлина к «Динамической теории электромагнитного поля», Избр. соч., стр. 660—663.

рый появился в результате математического исследования, с магнитной индукцией, свойства которой узнали из опытов с магнитами, мы не выходим за пределы экспериментального метода, потому что мы не вводим новых фактов в теорию; мы только даем наименование математической величине, и правомерность этого действия следует оценивать по согласованности свойств математической величины со свойствами физической величины данного наименования»<sup>1</sup>. После такой физической интерпретации математических символов буквально в следующих строках мы видим другую сторону дела. Максвелл, продолжая говорить о векторе магнитной индукции, относит его к первому из разделов данной им в первом томе «Трактата» классификации векторных величин и, таким образом, получает возможность распространить на физическую величину некоторые общие математические закономерности.

Перейдем, однако, к наиболее важному образцу максвелловской физической интерпретации — физической интерпретации коэффициента, связывающего электромагнитные и электростатические единицы электричества, иными словами, — к генезису электромагнитной теории света.

В «Трактате» Максвелл показал, что отношение электромагнитной единицы электричества к электростатической единице имеет размерность скорости.

«Из приведенной в параграфе 628 таблицы размерностей вытекает, что число электростатических единиц электричества в одной электромагнитной единице изменяется обратно пропорционально величине единицы длины и прямо пропорционально величине единицы времени, которые мы приняли.

Если, следовательно, мы определяем скорость, представленную этим числом, то даже в том случае, если мы примем новые единицы длины и времени, число, представляющее эту скорость, все еще будет числом электростатических единиц электричества в одной электромагнитной единице согласно новой системе измерения.

Эта скорость, указывающая отношение между электростатическими и электромагнитными явлениями, представляет собой поэтому величину определенного численного значения, и измерение этого значения является од-

---

<sup>1</sup> Избр. соч., стр. 458.

ним из наиболее важных исследований в области электричества»<sup>1</sup>.

Как уже говорилось выше, совпадение коэффициента в уравнениях Максвелла с обратной величиной скорости света не могло бы привести к электромагнитной теории света, если бы здесь не сказались созданные историческими условиями характерные черты научного мировоззрения и научного метода Максвелла.

Основные идеи электродинамики Максвелла вытекают из двух принципов классической физики — принципа сохранения энергии и принципа близкодействия. Принцип сохранения энергии для определенного круга явлений (электростатика, стационарные и квазистационарные поля) удовлетворялся и системой уравнений электродинамики дальнего действия. В электродинамике дальнего действия под энергией понимается энергия взаимодействия зарядов и токов. Она определяется мгновенным состоянием каждой пары взаимодействующих зарядов или токов, а общая энергия складывается из этих энергий взаимодействия. Напротив, в теории близкодействия, каковой является теория Максвелла, энергия — это энергия, локализованная в поле и характеризующаяся в каждом участке определенной объемной плотностью:

$$w = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} + \frac{\mu H^2}{8\pi}.$$

В быстропеременных полях эта формула не эквивалентна формулам

$$W_{\text{э}} = \frac{1}{2} \sum_{ik} \frac{e_i e_k}{R_{ik}}, \quad W_{\text{м}} = \frac{1}{2c^2} \sum_{ik} L_{ik} j_i j_k \quad (i \neq k).$$

В этом все дело. Электродинамику Максвелла следует считать первой стройной и последовательной теорией близкодействия, потому что она выводит из принципа близкодействия иные количественные соотношения, чем те, к которым приводит принцип дальнего действия. Соответственно реальность поля может быть доказана экспериментально. В основе лежит «четырёхмерный» характер близкодействия. Близкодействие здесь означает, что

<sup>1</sup> Избр. соч., стр. 526—527.

<sup>2</sup> См. И. Е. Тамм. Основы теории электричества. М., 1954, стр. 533.

действие поля на материальную точку (точечный заряд) определяется не мгновенным расположением зарядов (в момент, когда электромагнитное возмущение дошло до данного заряда, расположение уже иное, чем в момент, когда возмущение возникло), а состоянием поля в пространственной точке в тот момент, когда в ней находится этот заряд. Близкодействие означает также, что заряд передает свою энергию или импульс не другим зарядам, а полю. Соответственно, энергия и импульс являются предикатами поля.

Близкодействие в картезианском смысле означало, что импульс или энергия полученная частицей  $A$  от конца абсолютно жесткого стержня, соединяющего  $A$  с другой точкой  $B$ , передается ей в тот же момент, в какой частица  $B$  передает его стержню. Мы не можем указать промежутка времени, в продолжении которого энергия или импульс принадлежит не  $A$  и  $B$ , а стержню, играющему роль промежуточной среды. Соответственно, предположение о существовании такого стержня не связано однозначным образом с уравнениями поля.

Таким образом, в физике победила идея близкодействия, причем не в картезианской, а в совершенно иной форме. Близкодействие через абсолютно жесткий стержень — это трехмерное близкодействие, эквивалентное дальнедействию, если говорить об уравнениях поля. Близкодействие в классической электродинамике — это четырехмерное близкодействие, неэквивалентное дальнедействию, так как оно связано с конечной скоростью распространения деформаций поля.

Но близкодействие в такой простой и абсолютной форме сохранялось, пока электромагнитное поле рассматривалось макроскопически. Микроскопическая электродинамика не могла ограничиться этой простой формой. Когда теория относительности распространила идею конечной скорости взаимодействий и принцип близкодействия на физику в целом, история принципа близкодействия не закончилась. Начались те коллизии релятивистского и квантового представления о мире, которые и привели к решению вековой антиномии дискретности и непрерывности. Они были завершением развития классической электродинамики в последней четверти XIX в. и в первой четверти нашего столетия.

Рассмотрим основные этапы развития классической электродинамики после Максвелла. Одновременно с ее созданием появилось представление о локализации энергии в пространстве. Это представление ввел Н. А. Умов в 1873—1874 гг. Умов определяет плотность энергии в произвольной точке среды как частное от деления количества энергии, заключенного внутри бесконечно малого элемента объема, на этот элемент<sup>1</sup>. Он вводит понятие плотности потока энергии — произведение плотности энергии на скорость ее движения.

Десять лет спустя, в 1884 г., Пойнтинг, исходя из принципа локализации энергии, развил аналогичные представления для случая энергии электромагнитного поля.

Из принципа сохранения энергии вытекает, что электромагнитная энергия, сосредоточенная в некотором участке покоящегося однородного поля, может уменьшаться или увеличиваться только в том случае, когда она превращается внутри этого участка в другие формы либо когда она приходит из окружающего пространства или уходит в него. Если дополнить принцип сохранения энергии принципом близкодействия, становится ясным, что электромагнитная энергия может проникнуть внутрь участка только через его поверхность. Таким образом, баланс энергии зависит от потока энергии через поверхность рассматриваемого участка пространства, причем поток электромагнитной энергии определяется в каждой точке значением напряженности электрического и магнитного полей. Этот поток энергии пропорционален векторному произведению двух указанных величин.

$$S = \frac{c}{4\pi} [EH]$$

В последней четверти XIX в. все отчетливее становилась фундаментальная роль принципа локализации энергии. При этом принцип локализации начал играть новую историческую роль, которую он еще не мог играть у самого Максвелла<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Н. А. Умов. Избр. соч., М.—Л., 1950, стр. 153.

<sup>2</sup> См. М. Планк. Введение в теоретическую физику. Ч. III. М.—Л., 1933, стр. 10—28.

Планк, рассматривая принцип сохранения энергии как наиболее важный принцип, обобщающий всю физику в целом, называет его мостом, ведущим из механики в электродинамику<sup>1</sup>. Исторически это так и было. Электродинамика Максвелла опиралась на понятия аналитической механики, причем эти понятия принимали новый смысл, приобретали новое содержание. Максвелл последовательно наполнял этим новым физическим содержанием схемы Лагранжа. Но с последних лет XIX в. началось, если можно так выразиться, двустороннее движение по мосту, соединяющему механику с электродинамикой. Понятия, выросшие в электродинамике, двинулись по направлению к механике. Первостепенную историческую роль сыграло при этом открытие П. Н. Лебедева. Оно вызвало ряд работ, в которых последовательно выводились понятия импульса и массы электромагнитных волн. Эти понятия и идеи означали постепенное подчинение механики более общим законам электромагнитных явлений и вели к новой физической картине мира. Мы рассмотрим несколько подробнее развитие электродинамики по указанному пути, но сначала скажем несколько слов о его движущих силах.

Если исторические корни электродинамики Максвелла росли из производственной техники и экономических условий эпохи пара, то развитие электродинамики на рубеже XIX и XX вв. опиралось на новые производственные запросы и технические возможности, связанные так или иначе, прямо или косвенно с техническим переворотом, произведенным электричеством.

Разумеется, дело не сводится к вакуумной технике и вообще к электротехнике. Для создания электронной теории был необходим общий подъем экспериментальной техники и экспериментальных исследований. Такой подъем был связан с широкими научно-техническими тенденциями в производстве в целом. Но для всех названных тенденций можно указать прямую или косвенную, но несомненную связь с электрификацией в широком смысле, с перестройкой силового аппарата и технологии, созданием новых отраслей, новой организацией и культурой про-

---

<sup>1</sup> Там же, стр. 9.

изводства и вытекающими отсюда новыми масштабами и направлениями исследовательской работы.

Наиболее важным обобщением теоретической физики в девяностые годы была теория Лоренца.

Электродинамика Фарадея — Максвелла отказывала зарядам в самостоятельном существовании. В противовес старым идеям, сводившим электрические силы к взаимодействию зарядов через пустоту, физика близкого действия в той форме, которую она получила у Максвелла, рассматривала заряд как вторичное понятие. Но старая теория сохранила некоторые позиции: электромагнитное поле можно рассматривать с точки зрения запаздывающих потенциалов. Оно определяется тогда распределением зарядов и токов проводимости, но не мгновенным, а охватывающим предшествующие моменты времени. Конечно, идея запаздывающих потенциалов не может уже поколебать идею реальности поля, но может спасти реальность зарядов<sup>1</sup>.

Заряды сохранили свою реальность в электронной теории Лоренца — этом синтезе корпускулярно-зарядной и континуально-полевой концепции. Важно подчеркнуть, что такой синтез не только не поколебал идеи реальности поля, но углубил и конкретизировал ее. Электронная теория была обобщением электродинамики. В ней уравнения Максвелла для вакуума (с некоторыми поправками, указывающими на значение плотности элементарных зарядов и создаваемых ими токов) обобщаются на микроскопические поля. Из этой концепции вытекает идея конечной скорости распространения поля, представление о поле как о носителе энергии и импульса<sup>2</sup>.

Теория Лоренца отказывается от одной существенной посылки Максвелла. Согласно теории Максвелла, электродинамические явления протекают в движущихся системах так, как если бы эти системы не двигались. Движение системы не может оказать влияния на происходящие в ней электродинамические процессы и поэтому не может быть обнаружено в электродинамических явлениях. Максвелловский релятивизм интерпретировали при помощи

---

<sup>1</sup> И. Е. Тамм. Основы теории электричества. М.—Л., 1949, стр. 529.

<sup>2</sup> Там же.

представления об увлечении эфира движущимися телами.

В теории Лоренца эфиру приписывается абсолютный покой. Эфир представляется заполняющей пространство средой, в которой движутся атомы. Атомы состоят из элементарных электрических зарядов, эти заряды движутся в эфире. Они могут существовать и независимо от атомов — в виде свободных электронов. Поэтому ток проводимости в теории Лоренца теряет самостоятельную реальность, в основе его лежит конвекционный ток — движение ионов в электролитах и электронов в металлах. В теории Лоренца диэлектрическая постоянная и магнитная проницаемость перестают быть первичными определениями среды; они сводятся к диэлектрической поляризации и молекулярным токам. Поэтому Лоренц рассматривает величины  $\epsilon$  и  $\mu$  как статистическое усреднение большого числа электрических и магнитных дипольных моментов.

В этом смысле теория Лоренца как бы возвращается к атомистическим представлениям от чисто континуальной картины, вытекающей из уравнений Максвелла. Картина мира здесь, как и в термодинамике, распадается на макроскопически-непрерывное и микроскопически-дискретное представления, соединенные одно с другим статистическими понятиями вероятностей и средних величин. Но аналогия здесь не идет дальше сказанной. Она ограничивается выявившейся впоследствии недостаточностью корпускулярного микроскопического представления об электроне. Необходимость континуально-волнового аспекта в теории электрона была доказана только в двадцатые годы нашего века. Но уже сам Лоренц склонялся к мысли об электроне как о деформации эфира...

На основе представления о зарядах, движущихся в неподвижном эфире, была создана электродинамика движущихся сред. Ее можно было бы назвать электродинамикой медленно движущихся сред: она недостаточна, когда движение тел становится настолько быстрым, что нельзя уже пренебречь квадратами и более высокими степенями отношения скорости движения тел к скорости света. Там же, где скорость движения мала по сравнению со скоростью света, лоренцова электродинамика движущихся сред служит достаточно точным приближением и

не требует поправок, вытекающих из теории относительности<sup>1</sup>.

Лоренцова электродинамика движущихся сред привела к фундаментальным результатам, использованным впоследствии для преобразования механики на основе понятий, выросших из электродинамики.

Невозможность обнаружить эфирный ветер привела к кризису электродинамики Лоренца. Уравнения Лоренца теряют свою инвариантность при переходе от одной системы координат к другой, движущейся относительно первой. Из электродинамики Лоренца вытекала различная скорость распространения электромагнитных волн для тел, движущихся с различной скоростью по отношению к эфиру. Это затруднение исчезло после обобщения классической физики, произведенного в 1905 г. Эйнштейном. Теория относительности утверждает, что не только уравнения электродинамики Лоренца, но и уравнения механики инвариантны при переходе от одной инерциальной системы координат к другой; но такой переход описывается не преобразованиями Галилея, а преобразованиями Лоренца.

Принцип относительности требует, чтобы в классическую механику были внесены поправки в случае больших скоростей, сравнимых со скоростью распространения электромагнитных волн в пустоте. Более точная характеристика круга явлений, где классическая механика дает достаточно точное приближение, и круга, где необходимы релятивистские поправки, исходит из энергии. Классическая механика пригодна в тех случаях, когда изменения энергии малы по сравнению с собственной энергией частиц —  $E \ll Mc^2$ . В общем же случае требуется релятивистская теория. Где же практически применяются процессы, в которых изменения энергии сопоставимы с собственной энергией? Это ядерная энергетика, использование ядерной энергии.

Мы уже подчеркнули связь электротехники, в особенности электровакуумной техники, с истоками теории относительности, с развитием электродинамики в девяностые и девятисотые годы. Что же касается самой теории

---

<sup>1</sup> См. И. Е. Тамм. Основы теории электричества. М., 1949, стр. 531—532.

относительности, то ей соответствует техника середины нашего столетия и прежде всего использующая релятивистские эффекты ядерная энергетика. Мы опять видим, что техника, воплощающая в жизнь научную теорию, и техника, в результате развития которой эта теория появляется, не всегда тождественны. Электродинамика близкого действия получила широкое развитие задолго до того, как выросла экспериментальная и производственная техника, решившая ее спор с теорией дальнего действия. Она отражала вполне определенные производственно-технические запросы и возможности, но это не были запросы сильноточной электротехники.

Идея тока смещения появилась за двадцать лет до применения процессов, в которых ток смещения играет основную роль. Сильноточная электротехника, производственно-техническое применение и широкое изучение электромагнитного поля, радиотехника в ее первый период — все это воплощало в жизнь электродинамику Максвелла и вместе с тем, развиваясь приводило к новым техническим запросам, толкало вперед электродинамику, оказывалось причиной ее обобщения на микроявления.

Эта эволюция толкала науку к новым открытиям, получившим техническое воплощение в наше время. Роль техники в развитии науки и роль научных обобщений в развитии техники нельзя понять, если рассматривать науку и технику как дискретные ряды теорий и конструкций, которые связаны между собой дискретным рядом импульсов: определенные конструкции обобщаются в определенной теории, определенная теория воплощается в определенных конструкциях. На самом деле этот процесс непрерывнее и сложнее. Наука и техника развиваются в направлениях, которые определяются в значительной мере их внутренними силами и возможностями; научные теории обобщаются и применяются к новым частным запросам; производственно-техническое применение научной теории вносит в нее новые данные, которые впоследствии могут стать основой коренных перемен в ее содержании; физические концепции в своем развитии отражают не только производственно-технические импульсы, но и воздействие со стороны смежных, а иногда и отдаленных дисциплин.

С этой точки зрения релятивистское обобщение классической физики (нашедшее техническое применение только в середине XX столетия) было историческим результатом того общего подъема производительных сил и средств научного эксперимента, который так или иначе, прямо или косвенно связан с электрификацией. В науке этот новый период поставил учение об электричестве в несколько иное положение по сравнению с тем, которое оно занимало раньше. Теперь в живом взаимодействии физических теорий все чаще общезначимые идеи исходят из учения об электричестве. Конечно, в этом выражались объективные, не зависящие от исторических условий, собственно физические соотношения. Но они могли быть раскрыты в результате экспериментального и теоретического прогресса, связанного с прикладными и научными интересами, выросшими на основе электрификации производства.

Теория относительности выросла из электродинамики. Она потеряла первоначальную связь с попытками построить электромагнитную картину мира. Но мы сейчас рассматриваем не логическую структуру, а исторические корни теории относительности, и с этой оговоркой можно утверждать, что исторический исходный пункт теории относительности — развитие электродинамики Максвелла, происходившее в девяностые и девятисотые годы под явным воздействием новой техники, в которой электричество играло ведущую роль.

Теория относительности — обобщение классической идеи близкодействия. В отличие от нее квантовая механика вышла за пределы классической трактовки близкодействия и дальнего действия. Особенно это относится к релятивистской квантовой механике и к квантовой электродинамике. Квантовая электродинамика, созданная Дираком в 1927 г., в своем развитии (отчасти еще предстоящем) приводит к весьма значительному изменению принципа близкодействия. В классической электродинамике XIX в. пользовались принципом наименьшего действия и получали функцию Лагранжа, рассматривая электромагнитное поле как аналог механической системы с бесконечным числом степеней свободы, в которых степеням свободы соответствуют координаты пространственных точек поля, а обобщенные координаты заменены

значениями потенциала в этих точках. Такое, примененное еще в XIX в., формальное уподобление поля классической механической системе позволило Дираку распространить на электродинамику методы, с помощью которых были получены дискретные значения механических величин. Электромагнитное поле становится аналогом уже не классической, а квантовой механики. Поле рассматривается как результат суперпозиции монохроматических волн, а каждая такая волна — как аналог гармонического осциллятора. Планк показал, что энергия гармонического осциллятора принимает значения, кратные некоторой элементарной величине — кванту энергии. Соответственно квантуется электромагнитное поле, его энергия принимает дискретные значения. Существование фотонов перестает быть независимым допущением, оно выводится из квантовой электродинамики. Континуальное, классическое представление об электромагнитном поле сменилось корпускулярным представлением о фотонах. Но что происходит в пространстве, где нет фотонов и тем не менее происходят события, определенным образом влияющие на наблюдаемые явления? Это пространство названо «вакуумом» электромагнитного поля, иногда его называют «фоном» — разнообразие условных названий отражает незаконченный характер теории.

Название «вакуум» оправдывается отсутствием фотонов и других дискретных частиц. Но если в «вакууме» нет частиц, то в нем тем не менее есть материальная субстанция, в нем происходят события — именно порождения и аннигиляции элементарных частиц. Вакуум, поглощая фотон с энергией превышающей миллион электронвольт, порождает пару электрон — позитрон. Вакуум электромагнитного поля включает виртуальные, нерожденные электронно-позитронные пары. То обстоятельство, что вакуум электромагнитного поля — это не пустота, — очевидно; то, что он не является старым эфиром — упругой средой, носителем механических свойств, — также очевидно. Таким образом, вакуум снимает классическую коллизию пустоты и эфира. Но как обстоит дело с коллизией непрерывности и дискретности?

На первый взгляд идея вакуума в квантовой электродинамике восстанавливает в правах хотя бы частично концепцию непрерывного поля, вытесненную квантова-

нием поля. Но восстановленная континуальная среда состоит из нерожденных, виртуальных дискретных пар. Непрерывно, от точки к точке, меняется не вероятность пребывания элементарной частицы, а вероятность ее порождения. За кулисами статистических закономерностей квантовой механики, определяющих вероятность положений, скоростей и других переменных, оказываются не динамические (нестатистически определенные) «скрытые параметры», а статистические закономерности трансмутационных процессов.

Возникшая в квантовой электродинамике ситуация может получить более или менее наглядную форму при дальнейшем обобщении теории. В частности, идея квантованного пространства-времени позволила бы рассматривать вакуум электромагнитного поля как совокупность четырехмерных ячеек, в которых происходят элементарные трансмутационные акты. При некоторых условиях эти акты сливаются в мировую линию длительно существующей септожестивенной частицы.

Что касается иных, не электромагнитных полей (гравитационных, электронно-нейтринных, мезонных), то здесь квантовые теории делают только первые шаги. При этом электродинамика остается областью, откуда теория тяготения и мезодинамика черпают исходные представления и понятия.

Таким образом, и здесь, применительно к принципу близкодействия, антиномии классической физики, придававшие ей столь «неклассический», живой и противоречивый характер, снимаются в квантовой физике в процессе ее обобщения и дальнейшего еще более радикального пересмотра и ограничения классических понятий. Чем радикальнее пересматриваются эти понятия, чем дальше наука уходит от классических представлений, тем ближе ей становится дух классической физики XIX столетия, дух последовательных поисков все более сложных закономерностей природы, бесконечной не только во времени и пространстве, но и в неисчерпаемой сложности своих законов.

---

---

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

- I. Введение.* Теория относительности, квантовая механика, пути их обобщения и историческая оценка классической физики. Идея бесконечной сложности мира в физике XIX в. Производственно-технические корни и социальное значение классической физики XIX в. . . . . 3
- II. Принцип относительности.* Принцип относительности Галилея — Ньютона. Механика и физика. Уравнения движения и уравнения поля. Аналитическая механика и обобщенные координаты. Координатное представление физических процессов и понятие относительности. Квантование пространства и относительность . . . . . 27
- III. Принцип наименьшего действия.* Вариационный принцип в работах Лейбница, Мопертюи и Эйлера. Вариационный принцип в механике Лагранжа. Принцип Гамильтона. Оптико-механическая аналогия. Историческое значение формализации принципа наименьшего действия. Принцип наименьшего принуждения Гаусса. Механика Герца и принцип прямейшего пути. Связь вариационных принципов с многомерной геометрией. Вариационные принципы в релятивистской и квантовой физике . . . . . : 45
- IV. Принцип сохранения энергии.* Развитие понятий живой силы, работы и энергии в механике. Дискуссия о мере движения. Идея сохранения и учение о теплоте. Работы Майера, их содержание и историческое значение. Гельмгольц. Термодинамика и механика. Энгельс о сохранении энергии. Определение энергии и трактовка принципа сохранения у Планка. Сохранение импульса и энергии в теории относительности. Идеи Неттер и связь принципов сохранения с однородностью пространства и времени . . . . . 79
- V. Принцип необратимости.* Сади Карно и принцип необратимого перехода тепла. Принцип необратимости и понятие энтропии в работах Вильяма Томсона и Клаузиуса. Попытки механического истолкования принципа необратимости. Работы Максвелла. Больцман и статистическая трактовка второго начала термодинамики.

Флуктуационная гипотеза. Статистическая механика Гиббса. Теорема Нернста. Аксиоматизация второго начала термодинамики в работах Шиллера, Каратеодори, Планка и Афанасьевой-Эренфест. Принцип необратимости и понятие энтропии в теории относительности и в квантовой механике. Энтропия в теории информации. Тенденции дальнейшего развития идеи необратимости . . . . .

141

VI. *Принцип близкодействия*. Принцип дальнего действия в учении о гравитационных и электрических полях. Электродинамика. Фарадей и идея реальности поля. Развитие теории света. Эфир и проблемы увлечения эфира движущимися телами. Исторические корни электродинамики Максвелла. Метод Максвелла. Механические аналогии. Пуанкаре и Михельсон о неоднозначности механических теорий в физике. Уравнения Максвелла. Теория Лоренца. Классическая электродинамика и теория относительности. Идея близкодействия в квантовой механике и в квантовой электродинамике . . . . .

243

*Борис Григорьевич Кузнецов*  
**Принципы классической физики**

Утверждено к печати  
Институтом истории естествознания и техники  
Академии наук СССР

Редактор издательства *С. М. Ларин*  
Технический редактор *Е. В. Мажуни*

РИСО АН СССР № 10—104В Сдано в набор  
28/IX 1957 г. Подпис. к печати 17/1 1958 г.  
Формат 84×108<sup>1/32</sup>, 20, 25 печ. л.=16,61 усл.  
печ. л., 16,7 уч.-изд. л. Тираж 7000 экз.  
Т-00009. Изд. № 2586 Тип. зак. № 2321

*Цена 13 руб. 20 коп.*

Издательство Академии наук СССР  
Москва Б-64, Подсосенский пер., 21  
2-я типография Издательства АН СССР  
Москва Г-99, Шубинский пер., 10

## ОПЕЧАТКИ И ИСПРАВЛЕНИЯ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
10 56	8 сн. 13—14 сн.	Н. Н. Шиллера на $dt^2$ , получаем: $2 T dt^2 =$	Ф. Шиллера на $dt$ , получаем: $2 T dt =$
136	6 сн.	$1 + \frac{uv}{c}$	$1 + \frac{uv}{c^2}$
248	15 сн.	Функции по трем	Функции $\phi$ по трем
248	14 сн.	символом $\Delta$ и	символом $\Delta\phi$ , где $\Delta$
264	5 сн.	$F_e$	$F_m$

Б. Г. Кузнецов. Принципы классической физики.

