Физико · Математическое Наследие



Б. Г. Кузнецов

# Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна в свете современной науки

Физика

Философия физики

URSS

*Физико-математическое наследие: физика (философия физики)*

**Б. Г. Кузнецов**

# РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ИДЕЙ ОТ ГАЛИЛЕЯ ДО ЭЙНШТЕЙНА В СВЕТЕ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

Издание третье



URSS
МОСКВА

ББК 22.3г 72.3 87.3

**Кузнецов Борис Григорьевич**

**Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна в свете современной науки.** Изд. 3-е. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. — 520 с. (Физико-математическое наследие: физика (философия физики).)

В настоящей книге, написанной известным отечественным историком естествознания Б. Г. Кузнецовым, рассматривается историческая эволюция научных представлений о пространстве, времени, движении и веществе. Автор исследует развитие физических идей, начиная с науки XVII века, когда отдельные сведения начали складываться в сравнительно цельную картину мироздания, и заканчивая тенденциями теоретической физики, наметившимися в середине XX века.

Книга вызовет интерес как у физиков — научных работников, преподавателей и студентов, так и у философов, историков и методологов науки.

Издательство «Книжный дом "ЛИБРОКОМ"».
117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 9.
Формат 60×90/16. Печ. л. 32,5. Зак. № 2868.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».
117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

**ISBN 978–5–397–01112–9**

© Б. Г. Кузнецов,
наследники, 1963, 2009
© Книжный дом «ЛИБРОКОМ»,
оформление, 2009

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА
E-mail: URSS@URSS.ru
Каталог изданий в Интернете:
http://URSS.ru
Тел./факс: 7 (499) 135–42–16
URSS Тел./факс: 7 (499) 135–42–46

2937 ID 52124
9 785397 011129

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельцев.

*Памяти*
*Василия Павловича Зубова*

# ВВЕДЕНИЕ

Чем отчетливей вырисовывается смысл современных, еще не решенных проблем теоретической физики, тем яснее видна их связь с исторической ретроспекцией, тем чаще наука вспоминает о прошлых коллизиях в учении о пространстве, времени, движении и веществе. Очередные затруднения физической мысли могут быть преодолены лишь самой радикальной перестройкой оснований физики, быть может,— более решительным отказом от механического мировоззрения, чем в теории относительности и в теории квант. На пороге новых обобщений наука, готовясь к скачку, как бы оглядывается назад, переосмысливает содержание и значение самых старых, привычных и, казалось бы, незыблемых понятий.

Эти понятия оказываются исторически ограниченными, их можно теперь рассматривать как закономерные последовательные приближения развивающейся научной картины мира к ее оригиналу; иначе говоря, их можно и нужно рассматривать в историческом аспекте. Современная физика ищет пути синтеза концепций относительности и непрерывности пространства и времени, с одной стороны, и атомистических концепций — с другой, иначе говоря, идей, существующих с самого возникновения научной картины мира. По-видимому, объектом исторической ретроспекции становится наиболее фундаментальный принцип классической науки — представление о тождественной себе частице, движущейся в непрерывном пространстве. 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 и соответственно сделала объектом *исторического анализа* 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 временны́е отрезки изменяются в движущихся системах, что скорость света сохраняет одно и то же значение при переходе от одной инерциальной системы к другой, причем 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 себетождественных дискретных телах, движущихся одно относительно другого. В непрерывном пространстве движутся дискретные тела, их взаимные расстояния — функции непрерывного времени. Это традиционное разделение реальности на пространственно-временно́й 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 эвклидовой геометрии) мировым линиям в отсутствие силовых полей, то общая теория относительности утверждает, что тела в гравитационном поле движутся по

искривленным геодезическим линиям. Вообще говоря, гравитационное поле означает лишь отклонение от эвклидовых соотношений в четырехмерном пространственно-временно́м континууме, искривление этого континуума. Здесь поле как бы растворяется в пространстве — времени с определенными, зависящими от скопления масс геометрическими свойствами.

Однако и общая теория относительности не посягнула на представление о непрерывном движении тождественной себе частицы.

Законы, управляющие движением такой частицы, формулируются как дифференциальные законы, связывающие ее поведение в данной точке и в данный момент с ее поведением в каждый последующий момент. Если задан закон, определяющий поведение частицы или системы частиц в каждый последующий момент, и если этот закон действует непрерывно, мы можем гарантировать тождественность движущейся частицы самой себе.

Возникшая в середине 20-х годов нашего столетия квантовая механика несколько ограничила представление о тождественной себе частице, заданное состояние которой определяет в соответствии с некоторым дифференциальным законом ее состояние в каждый последующий момент. При движении элементарной частицы, однозначным образом с неограниченной точностью определена, вообще говоря, только вероятность пребывания частицы в каждой точке ее траектории. Скорость частицы в каждой точке также не может быть при любых условиях определена с неограниченной точностью.

Релятивистская квантовая механика, квантовая электродинамика и экспериментальные открытия порождения, аннигиляции и вообще трансмутации элементарных частиц нанесли, наконец, удар основному постулату классической физики. 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. Качественные трансмутации в классической физике исключены для элементарных частиц — качественные изменения сводятся к изменениям конфигурации системы, т. е. к движениям тождественных себе частиц.

Этот классический постулат был лишь поколеблен физикой первой половины XX в. Некоторые направления привели в своем развитии к представлению о движущейся частице как о сингулярности непрерывной среды, но они не покушались прямо на тождественность частицы самой себе. 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 при этом на неточность классической аналогии. Современная квантовая механика ограничивает классическое представление о тождественной себе частице, но не выводит его из более общей неклассической теории.

Такая более общая неклассическая теория еще далеко не создана, но ее смутные и неопределенные контуры уже позволяют по-иному оценить физические концепции прошлого. Мы рассмотрим в этой книге наиболее крупные направления физической мысли XVII—XX вв. в свете некоторых современных тенденций, не выкристаллизовавшихся, не дошедших до ранга однозначной теории, но уже настоятельно требующих нового угла зрения на прошлое. Речь идет о новом, более широком понимании понятия «механическая картина мира», о новых оценках картезианской физики, ньютоновского динамизма, о новой трактовке принципов однородности пространства и времени, сохранения, необратимости, близкодействия и, наконец, об историко-научной характеристике теории относительности и теории квант с позиций более общей квантово-релятивистской концепции.

Быть может, такой угол зрения вызовет некоторое недоумение. Если речь идет о тенденциях, еще не получивших сколько-нибудь законченной формы, то можно ли принимать их в расчет при переоценке исторических ценностей? Если включать эти тенденции в понятие «современная наука», то в последней нелегко будет найти устойчивые позиции, с которых можно более или менее однозначным образом оценивать эволюцию научной мысли. Никогда еще в физике не было такого общего предчувствия близких коренных сдвигов, никогда еще не было столь широкого применения методов «в кредит», в расчете на то, что будущая теория даст необходимое обоснование этих методов. Имеет ли смысл пользоваться подобным

«кредитом» для исторического анализа, исходить из наметившихся, но далеко не установившихся физических концепций при оценке научных идей прошлого?

Трудно дать априорный ответ на этот вопрос. Здесь, среди вводных замечаний, можно только отметить возможность некоторой общей переоценки прошлого, связанной с переходным и неустойчивым характером современных позиций науки и с несомненным радикальным характером назревшего перехода. Несколько лет назад Нильс Бор, оценивая одну из попыток обобщения современной теории поля — единую спинорную теорию Гейзенберга, сказал о ней: «Эта теория несомненно безумна, но достаточно ли она безумна, чтобы быть правильной?..» Эта очень тонкая и глубокая характеристика современной ситуации, когда трудно сказать что-либо бесспорное о дальнейших путях науки, но абсолютно бесспорным представляется их коренное, более коренное, чем у физических теорий первой половины столетия, отличие от классических путей, их «безумие» при оценке с классических позиций.

Это «безумие» отличается от парадоксов физики первой половины нашего столетия. Эйнштейн приписал физический смысл четырехмерному «пространству» и парадоксам неэвклидовой геометрии. Бор и Гейзенберг придали физический смысл другому парадоксу, уже не геометрическому, а скорее логическому: о частице в данный момент нельзя в общем случае сказать, находится она в данной точке или не находится. Такой парадокс противоречит принципу исключенного третьего классической логики. *Новые* парадоксы физики, ее новое «безумие», относятся к исходным соотношениям логики и математики. Эти соотношения приобретают физический смысл, когда наука находит связь между существованием нетождественных физических объектов и непрерывным движением тождественной себе частицы.

При сопоставлении науки в прошлом с современными тенденциями на первый план выступают «неклассические» стороны классической науки: ее противоречия, поиски, нерешенные, адресованные будущему проблемы. Это относится уже к Галилею. Его мировоззрение, как и вся наука XVII в., выглядит живым, далеко не застывшим, с множеством полутеней, переходов, поисков и нерешенных проблем. Но эта живая, неустоявшаяся стихия ищущей мысли характерна и для XVIII в., при всей его

рационалистической упорядоченности и несмотря на застывшую картину неподвижной или неизменно повторяющейся природы. Она характерна и для Ньютона, который казался — и в известной мере был — апостолом раз навсегда данной догмы, и для всей эволюции классической физики. При достаточно ярком освещении указанной стороны классической физики ее история не может оставаться перечислением позитивных ответов — она включает то, что Эйнштейн называл «драмой идей» и что он искал в истории науки: исчезающие, вновь и вновь встающие перед наукой «проклятые вопросы», решение которых никогда не бывает окончательным и вместе с тем все более приближает науку к объективной истине [1].

[1] Книга, в которой эволюция представлений нового времени о пространстве, времени, движении и веществе рассматривалась бы с современных позиций и которая включала не только позитивные результаты, но и апории науки, была задумана давно — больше двадцати лет тому назад. В 50-е годы этот замысел оказался в некоторой мере реализованным в трех книгах, выпущенных Издательством Академии наук СССР: «Развитие научной картины мира в физике XVII—XVIII вв.» (1955 г.), «Принципы классической физики» (1958 г.) и «Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии» (1957 г.). Сейчас, в 60-е годы, возможна более конкретная, чем раньше, формулировка новых исходных позиций исторической ретроспекции. В результате основательной переработки указанных томов (включавшей не только значительное сокращение текста, но и новые оценки и обобщения) появилась предлагаемая читателю книга. В нее вошли и некоторые оценки из других работ автора, выпущенных в самом конце 50-х и в начале 60-х годов, в особенности из физических глав «Эволюции картины мира» (1961 г.). Настоящее, второе издание отличается от первого более общим освещением соотношения между идеей относительности, с одной стороны, и идеей дополнительности — с другой, и несколько более подробным освещением развития релятивистской космологии после Эйнштейна.

# I. ГЕЛИОЦЕНТРИЗМ И НАЧАЛО МЕХАНИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ МИРА

## 1. Наука XVII в. и ее исторические истоки

Начиная с XVII в. естествознание включает не только верные, соответствующие объективной действительности отдельные астрономические, механические, физические, химические, геологические и биологические сведения, но и некоторую сравнительно цельную общую научную картину мироздания. Историческое развитие не только видоизменяет такую картину, но и подтверждает ее основные идеи — идеи бесконечности, однородности и изотропности пространства.

В предыдущий период было создано представление, которое в дальнейшем могло уточняться, но уже не могло быть пересмотрено в своих основах,— гелиоцентрическое представление о солнечной системе. Но это еще не общая картина мира, охватывающая всю природу, обобщающая всю сумму естественнонаучных знаний. Условием такой картины было объединение гелиоцентрической астрономии с земной механикой. В результате этого объединения появилось представление о законах механики, управляющих всеми явлениями природы. Впоследствии выяснилось, что к таким общим законам не сводятся более сложные закономерности физических и тем более химических и биологических явлений. Механическая картина мира в дальнейшем развернулась в более точную и многокрасочную картину, показывающую специфические черты отдельных областей явлений и связь между различными областями. Но так или иначе было положено начало непрерывному развитию картины мира и накоплению достоверных знаний в ее рамках.

Это произошло в XVII в. В течение предшествующего периода основной движущей силой развития естествознания была начавшаяся в конце XV в. техническая рево-

люция, великие географические открытия, мировая торговля, развитие архитектуры, фортификация, кораблестроение, строительство портов, дорог и каналов, а также борьба новых общественных классов против феодальных сил, политические и культурные явления, связанные с Реформацией и включавшие крушение духовной диктатуры церкви.

Средневековое ремесло в течение последних десятилетий XV в. было ареной значительных технических сдвигов. Эти сдвиги не оказали такого непосредственного воздействия на характер научных представлений, как мануфактура XVI—XVIII вв., так как здесь еще не было расчленения производства на отдельные технологические операции. Однако технические сдвиги в средневековом ремесле подготавливали такое расчленение. Вместе с тем они способствовали значительному накоплению сведений о физических и химических процессах, сведений, еще ожидавших рационального истолкования.

Гигантское расширение эмпирической основы представлений о природе принесли с собой великие географические открытия. Еще раньше европейцы заимствовали многочисленные технологические приемы и сведения о природе, накопленные на Востоке; теперь же благодаря путешествиям они усвоили множество новых географических, геологических, физических, химических и биологических знаний. Новые знания не укладывались в привычные рамки средневековой схоластики.

Великие географические открытия и морская торговля дали толчок мануфактурному производству. С морской торговлей было прежде всего непосредственно связано кораблестроение. Непрерывно изменявшиеся направления и условия морского, а в дальнейшем и океанского транспорта требовали сравнительно быстрого перехода к новым типам судов. Технический прогресс был настолько быстрым, что наряду с эмпирической судостроительной техникой теория корабля стала необходимым условием развития морской торговли и транспорта. Впоследствии появились технические сочинения о постройке кораблей, основанные на законах механики.

Запросы мореплавания двигали вперед и конструирование физических приборов: подзорные трубы и секстанты нашли первое практическое применение на кораблях. На кораблях и часы стали важным навигационным ин-

струментом: с их помощью определяли долготу. Производство часов, первого автоматического прибора, было школой наиболее сложных приемов технической механики.

Развитие торговли в Европе потребовало нового транспорта и, в частности, сооружения шлюзов и каналов. Так создавались новые области строительной механики. Старой ее областью была архитектура, которая с древности служила практической базой статики.

Архитектура, фортификация, кораблестроение, строительство портов, дорог и каналов развивались и в средневековье. Чего не знало раннее средневековье — это мануфактурного производства. Его развитие объясняет многие характерные черты науки XVII—XVIII вв.

Для механики наибольшее значение имело спорадическое применение машин в мануфактурном производстве. На предприятиях XVI—XVIII вв. применялись механизмы. Широко были распространены устройства, действующие на обрабатываемый предмет давлением при вращательном или поступательно-возвратном движении своих частей: прессы в виноделии, аппретурные станки в текстильной промышленности, прокатные и плющильные станки в металлообработке. Применялись также молоты, приводимые в движение давлением кулака вала на рычаг, воздуходувки, сверлильные аппараты, станки для резания проволоки, шлифовальные станки и т. п. Наряду с древней зубчатой передачей позднее средневековье знало канатную и ременную передачи. По сравнению с трансмиссиями древности ременная и канатная передачи позволяют приводить в движение несравненно большее число станков. В связи с этим стали чаще применяться известные древности простые машины: рычаги, блоки, винты, наклонные плоскости и различные сочетания этих элементов. На строительных площадках, в арсеналах, на верфях, горных разработках и мануфактурных предприятиях XVII в. можно было видеть полиспасты, лебедки, различные комбинации блоков и другие механизмы, расчет которых требовал некоторого знания теории простых машин.

Если оценивать технический прогресс в XVII в. со стороны его воздействия на развитие науки, то на первый план выступает энергетика крупных мануфактурных мастерских, верфей, рудников и металлургических заводов.

В XVI в. технические сдвиги состояли преимущественно в широком распространении принципов, осуществленных в конце XV в. Развитие техники приводит к значительному расширению мастерских, верфей, заводов и горных разработок и к необходимости новых источников движущей силы. Широко распространяются водяные двигатели — исходный пункт развития новых механических знаний.

Примером может служить горное дело. XVII век сохранил большинство конструкций, известных Агриколе, но в горной механике появились несравненно более крупные и несравненно более разнообразные, чем в XV—XVI вв., устройства для подъема руды, откачки воды и т. д. В результате углубления разработок горные механики убедились в невозможности поднять воду при помощи наземного насоса со слишком большой глубины и столкнулись с другими проблемами механики жидкостей. В связи с горными разработками впервые занялись и изучением проблемы вентиляции, и это привело к теоретическим исследованиям динамики воздушных потоков.

В металлургии XVII в. конструкции и приемы, найденные еще в XV в., получили широкое распространение в новых металлургических районах. Доменное производство чугуна, литье из чугуна и передел чугуна в железо распространились в Германии, Италии, Швеции, Франции, России и Англии. Во всех этих странах переходили к более крупным установкам. В XVII в. появились доменные печи, выпускавшие по нескольку тонн металла ежедневно. Такие крупные предприятия прежде всего нуждались в механических двигателях для дробления руды, воздуходувок и обработки железа. В производстве кричного железа также требовались большие масштабы и новые конструкции для обработки криц. XVII век — время быстрого развития и широкого применения крупных молотов, приводимых в движение водяными колесами.

Сосредоточение ремесленных инструментов на сравнительно крупных предприятиях, огромные размеры горных и металлургических агрегатов — все это приводило к созданию мощных двигателей. Главным механическим двигателем мануфактуры стало водяное колесо.

По мере распространения механических двигателей, трансмиссий, станков и особенно сложных автоматов все

чаще встречался тип ученого-механика, известный уже в XV в. Раньше подобный тип был немыслим; до XV в. под механиком подразумевали мастера-эмпирика, а под ученым — комментатора церковных либо аристотелевых книг. Появление людей, которые не были ни цеховыми учеными, ни представителями ремесленной практики, имело принципиальное значение и для техники и для естествознания.

Механики ближе всего стояли к архитекторам. По мере того как гидротехника в широком смысле, т. е. строительство каналов, водопроводов, фонтанов и водяных мельниц наряду с сооружением домов, храмов, дворцов и крепостей, стала основой развития механики, изменился и характер основных проблем последней. Машины, особенно мельницы, ставили перед механикой твердых тел динамические проблемы.

Вместе с отходом от чисто эмпирических методов производственные знания начинают отрываться от непосредственного выполнения производственных операций. Появляются школы, где учащиеся воспринимают не ремесленные секреты, а некоторые общезначимые сведения. Соответственно развивается научно-техническая литература. В этих школах и в этой литературе переходят от чисто эмпирических рецептов к разъяснению причинных связей. Школы механических и математических знаний отличаются от университетов и церковных школ, где попрежнему господствует схоластика. В новых школах получают подготовку архитекторы, артиллеристы, фортификаторы, строители, конструкторы. Они группируются при дворах монархов, сооружающих крепости, дворцы, каналы, водопроводы и мануфактурные предприятия; здесь постепенно возникают придворные научные общества и академии. В центре внимания этих обществ и академий стоят вопросы прикладной, а впоследствии и теоретической механики.

Водяные и ветряные двигатели, насосы, механические трансмиссии и станки, применявшиеся в мануфактурных мастерских, на верфях, заводах и рудниках, автоматические приборы (часы) и артиллерия были областями, откуда исходили наиболее важные для науки импульсы. Механика XVII в. вышла за пределы статических задач. Как уже было сказано выше, наука XVII—XVIII вв. стремилась объяснить все сложные явления природы механическими аналогиями и понятиями; однако пока са-

мой механике еще не были известны законы динамики, указанная тенденция не могла привести к построению системы, объясняющей космические явления механическими причинами. Динамика XVII в., подготовленная развитием прикладной механики и особенно применением машин, сформулировала простые законы, которые стали идеалом научного объяснения для всего естествознания на очень долгий срок. Понятия инерции, импульса и ускорения были рамкой, в которую должны были уложиться результаты естественнонаучных наблюдений, сначала астрономических, а затем физических, химических и геологических. Торговля и путешествия вносили свой вклад в непрерывно растущую сумму таких наблюдений, но рамка, в которую они должны были укладываться, подготовлялась мануфактурным производством и определилась лишь в конце XVII в.

Если спорадическое применение машин в мануфактурной энергетике открыло дорогу научным представлениям о рациональной связи между различными формами механического движения, то собственно технологическая сторона мануфактурного производства не могла иметь такого значения. В своей технологии, в применении физико-химических рецептов мануфактуры пользовались ремесленными традициями. Базисом мануфактуры оставалось ремесло.

В ремесленной физико-химической технологии ремесленные «тайны» действительно были тайнами. Когда в тигель с серебряной рудой бросали соль, колчедан и ртуть, никто в XVII в. не мог бы сказать, каким именно образом получается амальгама. Здесь не было расчленения производства на элементарные пары причин — следствий, где причина и следствие тождественны по своей природе. Чтобы представить себе причинную механическую связь между наличием соли и образованием амальгамы, нужно было показать элементарные перемещения и сочетания атомов вещества. Но до этого было еще очень далеко. Для технолога-эмпирика XVII в. причинная связь заменялась таинственным, освященным традицией, эмпирически установленным «влиянием» соли или ртути. С ремесленно-эмпирическим характером физико-химической техники связаны представления о «влияниях», «симпатиях», «принципах» — весь арсенал средневековой схоластики. Напротив, инженера-механика, архитектора, строителя

водяных колес связывает с ученым нового типа именно каузально-механическое представление о природе.

Механику толкала вперед также военная техника. Изобретение пороха и возникшие отсюда технические сдвиги усилили роль прикладной механики в научном развитии. Чисто механические задачи баллистики были одним из основных практических истоков динамики XVII в. Проблема движения свободно брошенного тяжелого тела впервые была поставлена в баллистике. При составлении таблиц для артиллерийской стрельбы необходимо было установить, как движется ядро под влиянием начального импульса и силы тяжести. Вычисление траектории ядра оказалось областью, где при помощи теоретических построений было изучено сложение инерционного движения с равномерно ускоренным в поле тяготения.

Связь естествознания с производственно-техническими нуждами не объясняет, однако, напряженности и размаха, характерных для разработки механической картины мира, не объясняет конкретных исторических форм идейной борьбы в естествознании XVII в.

Указывая исторические истоки современного естествознания, надо говорить не только о развитии производительных сил, но и о возникновении новых общественных отношений.

Естествознание в XVI—XVII вв. исторически связано с возникновением буржуазных общественных отношений в рамках феодализма, с борьбой буржуазии против феодалов. В XVI—XVII вв., как ни далеко еще было торжество буржуазии, уже сказались некоторые результаты развития капиталистического производства и столкновений между буржуазией и дворянством. Эти результаты заключались, в частности, в развитии научных интересов и науки.

Классовая борьба сообщила культуре того времени боевой характер, смелость и широту. В этой атмосфере механические знания стали механическим мировоззрением. Его создатели не только отвечали своими работами на запросы составителей календарей, строителей и артиллеристов, они боролись за освобождение общества от отживших сил.

Воздействие классовой борьбы на развитие естествознания было достаточно сложным. Экономически и политически вызревая в недрах феодального общества, буржуазия была враждебна этому обществу. Она готови-

лась к атаке, направленной против феодальных порядков; ее борьба за новый общественный строй сливалась с широкими народными движениями. И вместе с тем удачливые выходцы из буржуазии, рыцари первоначального накопления обивали пороги королевских дворцов, искали соглашения с феодалами, страшились широких народных движений, жестоко расправлялись с наиболее прогрессивными деятелями своего времени и в лице откупщиков объединялись с иезуитами для борьбы против революции. Чем последовательнее и решительнее буржуазия боролась против старого общества, тем с бо́льшим правом она выступала от имени народа; чем больше буржуазная общественно-философская мысль отражала интересы и чаяния широких масс, тем внушительнее и прогрессивнее было ее воздействие на те конкретные исторические формы, которые принимало естествознание в XVII—XVIII вв. Недаром Энгельс в известных замечаниях об истоках современного естествознания указывает на восстания крестьян, за которыми «показались предшественники современного пролетариата с красным знаменем в руках и с требованием общности имущества на устах»[1]. Это не нейтральный исторический «фон», а реальные исторические корни, объясняющие остроту борьбы между наиболее прогрессивными направлениями науки и реакцией.

Наука, и прежде всего обобщающий результат научного эксперимента, эмпирических наблюдений и математического анализа, обобщающий результат всех путей и методов научного творчества — физическая картина мироздания, была арсеналом борьбы против церкви. Литературно-художественная деятельность гуманистов, пробуждавшая в обществе чувства и мысли, не совместимые с церковным авторитетом, реформация, отвоевавшая у католицизма целые страны, и, наконец, прорвавшая оболочку деизма, прямая, смелая и, как говорили перепуганные реакционные историки, «разнузданная» атака мыслителей XVIII в. на религию — все это расчищало дорогу науке. В свою очередь картина бесконечной Вселенной, управляемой простыми механическими законами, стала мощной общественной силой, которую борющиеся стороны оценили в полной мере в драматические моменты, ког-

[1] К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, 2-е изд., т. 20. М., 1961, стр. 345.

да Бруно сделал антитеологические выводы из коперниканства, когда Вольтер, распространяя идеи Ньютона, требовал «раздавить гадину» — католическую церковь, когда другие, более радикальные мыслители XVIII в., опираясь на выводы науки, призывали громы народной революции на церковь и абсолютизм.

## 2. Коперник

Исходным пунктом картины мира, созданной в XVII в., было появившееся в середине предшествовавшего столетия учение Коперника. Оно содержало доказанную всем последующим развитием науки кинематическую схему солнечной системы, ставшую отправной точкой развития небесной механики и позволившую в конце концов применить понятия земной механики к космосу. Вместе с тем система Коперника, бросившая вызов церковному догмату и схоластической традиции, была началом непрерывных сражений между естествознанием и силами средневековья.

В течение трех веков система Коперника стояла не только в центре астрономических исследований, но и в центре общественно-философской борьбы.

Одним из важнейших направлений борьбы был вопрос об объективном характере гелиоцентризма. Церковь отстаивала традиционную канонизированную догму и подчас пыталась объявить новое представление о мире удобным, но не претендующим на объективное значение соглашением. В этой области шла напряженная борьба между такой прагматически-формальной версией и стремлением передовых мыслителей нарисовать картину мира, соответствующую объективной реальности.

В астрономии средних веков решающее значение придавали догмату об абсолютной грани между Землей — несовершенной, греховной областью эксцессов и изменений — и совершенным, неизменным, абсолютным небом. Несовершенная Земля оказывалась, однако, центром мироздания. Средневековая астрономия повторяла учение Аристотеля и Птолемея о круговом и равномерном (т. е. совершенном и неизменном) движении небесных тел. Небесные тела вращаются с постоянной скоростью вокруг неподвижных тел. Таким неподвижным телом служит Земля, и всякое движение, как оно представляет-

ся земному наблюдателю,— истинное и абсолютное движение. Однако планеты движутся неправильно. Они описывают неправильные фигуры на фоне неба. Некоторые из них: Меркурий и Венера — всегда движутся вблизи Солнца, иные: Марс, Юпитер, Сатурн,— то неподвижны относительно других звезд, то движутся между звездами с запада на восток, то с востока на запад. Само Солнце, по-видимому, движется неравномерно вокруг Земли, так как времена года несколько отличаются друг от друга по продолжительности. Чтобы объяснить неравномерность в движении небесных тел, Гиппарх поместил Землю не в самом центре круговой орбиты Солнца. При этом вычисленная продолжительность времен года соответствовала наблюдениям. Неправильное движение планет можно было представить себе, предположив, что планеты движутся по окружностям (эпициклам), а центры этих эпициклов сами движутся по круговым орбитам. Аристотель думал, что его астрономическая система совпадает с объективной реальностью. Птолемей, напротив, единственным критерием астрономических построений считал принцип наибольшей простоты описания явлений. Некоторые позднейшие мыслители древности вообще отрицали познаваемость движения небесных тел.

*После Коперника астрономия стала на путь отказа от* мистических аргументов, теологических критериев, соображений о «совершенстве» неба и т. п. Этот путь вел астрономию к сближению с земной механикой. Коперник отбросил схоластические категории, которые доказывали абсолютное различие между Землей и небом. Действительное объединение небесной и земной механики было достигнуто только Ньютоном, но в течение XVI—XVII вв. крупнейшие открытия в области астрономии и постепенное развитие понятий механики были этапами последовательного сближения теории движения небесных тел и механики земных предметов. После Коперника Кеплер создал небесную механику, рациональное истолкование которой должно было привести к единой системе, объединившей опыт производственной прикладной земной механики с результатами астрономических наблюдений. Галилей совершил переворот в мировоззрении и методе науки, показав, что вся Вселенная является бесконечным полем для исследования, пользующегося рациональными методами земной механики.

Исходным пунктом очерченного пути была книга Коперника «О вращениях небесных сфер». Коперник — истинный сын своего века, разносторонний мыслитель и практик, организатор вооруженного отпора тевтонским рыцарям, выдающийся экономист, врач и государственный деятель. Фрауэнбургский каноник критически относился и к католическим и к протестантским церковным догматам, за что и Рим и Виттенберг заплатили ему посмертной враждой. Посмертной, так как знаменитая книга «О вращениях небесных сфер» вышла из печати в 1543 г., незадолго до смерти автора.

Излагая в этой книге кинематическую картину солнечной системы, Коперник исходит из следующих соображений. Меркурий и Венера всегда кажутся с Земли находящимися возле Солнца и никогда не оказываются на противоположной стороне неба. При этом Меркурий всегда ближе к Солнцу; он никогда не отходит от Солнца на такое расстояние, как Венера. Отсюда следует, что Меркурий и Венера обращаются вокруг Солнца по орбитам, находящимся внутри орбиты Земли, их орбиты ближе к Солнцу. Марс, Юпитер и Сатурн иногда противостоят Солнцу; иными словами, Земля оказывается между Солнцем и этими планетами; во время противостояния эти планеты светят ярче всего и, следовательно, находятся ближе к Земле. Отсюда следует, что орбиты указанных трех планет дальше от Солнца, чем орбита Земли. В их видимых движениях заметны некоторые неправильности, причем они обладают периодичностью, соответствующей земному году, и, следовательно, могут быть объяснены движением Земли вокруг Солнца. Чем меньше эти неправильности, заключает Коперник, тем дальше соответствующая планета; значит, Сатурн вращается по наиболее отдаленной орбите, затем идут Юпитер и Марс. Таким образом, Земля не центр мироздания, а одна из шести планет, обращающихся вокруг Солнца. Эта схема развивается и доказывается большим числом математических построений. Их нет в первом изложении коперниканской системы — кратком наброске, который Коперник сделал в молодости. Этот трактат, известный под названием «Commentariolus», не был напечатан, а рукопись его была найдена лишь в 1877 г.

В нем Коперник утверждает, что Земля служит центром лишь для обращения Луны, а центром обращения

всех планет служит Солнце. Неподвижные звезды удалены от Солнца так далеко, что это расстояние несоизмеримо с радиусами планетных орбит. Видимое движение всего небесного свода в целом объясняется действительным обращением Земли вокруг оси. Годичное движение Солнца объясняется истинным годичным движением Земли вокруг него. Это же годичное движение Земли вокруг Солнца служит причиной кажущегося изменения звездного неба в течение года. Выдвинув эти утверждения, Коперник вкратце излагает гелиоцентрическую систему, причем строго придерживается принципа кругового движения небесных тел. Этот принцип, унаследованный новой астрономией от древности и средневековья, удержался не только у Коперника, но и у Галилея, и только Кеплер ввел эллиптические движения в небесную механику. Чтобы согласовать видимое движение небесных тел с принципом круговых равномерных движений, Коперник, так же как Птолемей, выдвигает идею составления сложных движений из равномерных круговых — идею эпициклов. Если планета не описывает правильного круга, то это означает лишь, что она движется по окружности, центр которой сам находится в круговом движении. Заменив основную идею Птолемея — неподвижность Земли — совершенно новым принципом, Коперник сохранил эпициклы и эксцентры птолемеевой небесной механики.

Для истории науки особенно важен принцип относительности движения, высказанный Коперником в его книге. Остановимся подробнее на этом принципе.

Коперник пользовался понятием относительного движения. Он показал, что если Земля обращается вокруг Солнца, то видимое движение Солнца будет таким же, как если бы Солнце обращалось вокруг Земли. Отсюда следует, что видимое движение небесных тел может быть следствием не только действительного движения этих тел, но и действительного движения Земли. Коперник вспомнил известный еще в древности и широко применявшийся в средневековой научной литературе образ берегов, движущихся относительно корабля. Он цитирует стихи Вергилия:

Гавань мы покидаем: назад отступают и город и земли...

При помощи принципа относительности движения Коперник боролся против аргументов геоцентризма. Гео-

центрическая концепция обосновывалась картиной разрушительного урагана, который снес бы все с земной поверхности, если бы Земля вращалась. Коперник говорил, что атмосфера Земли участвует в ее вращении, и поэтому все явления, происходящие в воздухе, не могут продемонстрировать движение Земли.

Кинематика неба у Коперника не формальная математическая гипотеза, а абсолютная физическая реальность. Коперник, так же как впоследствии Кеплер и Галилей, утверждал абсолютную физическую реальность описываемых в его книге истинных движений небесных тел. Иная трактовка содержалась в известном предисловии Осиандера в книге Коперника. Это предисловие — результат реакции против коперниканства.

В годы, когда появилась книга Коперника, протестантские богословы относились к научной картине мира с неменьшей непримиримостью, чем католическое духовенство. В эти годы нарастало грозное крестьянское движение. Лютер, Меланхтон и другие руководители протестантства перенесли центр тяжести своей деятельности на подавление крестьянских восстаний и на борьбу с ересями. Крестьянская война испугала Лютера больше, чем лютеранство испугало Ватикан. Борьба против протестантства никогда не велась с такой энергией и жестокостью, как борьба объединившихся имущих классов против крестьянского восстания. Лютер призывал германских князей к расправе с восставшими крестьянами: «Пусть всякий колет, бьет и душит их, тайно и явно, как убивают бешеных собак, пусть всякий помнит, что нет ничего более ядовитого, вредного и дьявольского, чем бунтовщик».

Протестантская церковь проявляла абсолютную нетерпимость к каким бы то ни было отступлениям от буквы священного писания. Католическое духовенство защищало авторитет не только ветхозаветных и новозаветных книг, но и отцов церкви и аристотелизма: протестантство же опиралось на букву библейских текстов, которые не подлежали какому бы то ни было свободному толкованию. Борьба против свободной мысли включала беспощадное подавление малейших отступлений от «физики Моисея». Виттенбергские теологи объявили, что «разум следует подавлять верой». Поэтому в годы, когда Ватикан еще не разглядел в коперниканстве своего врага, Лютер уже называл Коперника «дураком, желающим

опрокинуть все астрономическое искусство», и напоминал, что Иисус Навин остановил не Землю, а Солнце. Ближайший сподвижник Лютера и идеолог протестантства Меланхтон требовал государственных репрессий против коперниканцев.

Издание книги Коперника «О вращениях небесных сфер» велось под наблюдением одного из единомышленников Лютера и Меланхтона. Коперник передал рукопись книги своему другу и почитателю Ретику, который отвез ее в Нюрнберг. Однако Ретик не смог следить за изданием и поручил это протестантскому богослову Андрею Осиандеру. Чтобы вырвать из книги ее антицерковное жало, Осиандер составил «Обращение к читателю о гипотезах сего сочинения», которое было напечатано в начале книги и долгое время приписывалось самому Копернику. Главная мысль осиандеровского «Обращения» состоит в том, что движение Земли представляет собой чисто формальную математическую гипотезу, и «безумец может думать, будто в книге доказывается движение Земли».

Между тем сам Коперник подчеркивал объективное физическое значение гелиоцентрической системы. Средневековые схоласты, выдвигая фиктивные, чисто формальные представления, любовались их логической стройностью. Они подчеркивали, что такие построения не имеют абсолютного значения и служат лишь формальным приемом для описания явлений. Для средневекового схоласта наука могла включать произвольные построения, потому что она была по существу областью условных истин.

Напротив, для нового естествознания наука была описанием и объяснением действительности и критерием научных теорий было их соответствие действительности. Эта тенденция новой науки вступала в противоречие с требованиями церкви. Предисловие Осиандера очень ярко выражает характерную тенденцию: ограничить значение новой науки практическим удобством и отвергнуть претензию науки на объективный характер научных истин.

В своем предисловии Осиандер говорит, что Коперник вовсе не стремился описать действительное движение планет. По его мнению, астрономия вообще не ставит перед собой такой задачи. Гипотезы астрономов, по мнению Осиандера, имеют чисто прагматическое значение. Астроном должен прийти к правильным вычислениям, необходимым для составления календарей и тому подобных за-

дач. «Гипотезы его могут быть и несправедливыми, могут быть даже невероятными; достаточно, если они приводят нас к вычислениям, удовлетворяющим нашим наблюдениям» [2]. Система Коперника, в частности, основана на чисто условных гипотезах. «И если она подобное придумывает, и придумывает даже довольно многое, то происходит это вовсе не с целью убедить кого-либо, что все это действительно так, но для того только, чтобы можно было вести вычисления» [3].

По мнению Осиандера, подлинная истина может быть лишь результатом «откровения»; что же касается астрономических работ, то они содержат лишь условные утверждения. Осиандер говорит, что и астрономы, и философы должны ограничиваться условной истиной.

Большая часть богословов второй половины XVI в. не выступала против Коперника, приняв точку зрения, изложенную Осиандером. В то же время католическая церковь для своих практических задач, связанных с реформами календаря, пользовалась работами Коперника. Так установился компромисс между практическими — в последнем счете производственными — нуждами, с одной стороны, и идеологическими устоями средневековья — с другой.

Компромисс был недолгим. По существу система Коперника была несовместима с признанием церковного авторитета и книга «О вращениях небесных сфер» была вызовом церкви. Этот вызов полвека спустя был брошен церкви в прямой форме Джордано Бруно.

Прочитав книгу Коперника, Бруно решительно порвал со средневековыми представлениями о Вселенной. Обвиненный в ереси, он бежал от неаполитанской инквизиции. Начались пятнадцатилетние скитания Бруно. Он переезжал из Нолы в Турин, из Турина — в Венецию, попал в Женеву, где за двадцать пять лет до этого кальвинисты сожгли Сервета, потом во Францию, Англию и Германию. Скитания Бруно окончились в 1591 г. приездом в Венецию, куда его пригласил венецианский аристократ Мочениго, вскоре предавший Бруно в руки инквизиции. Из Венеции Бруно был препровожден в Рим. После семилетнего заключения по приговору инквизиции Бруно

---

[2] Сб. «Николай Коперник». М.— Л., 1947, стр. 188.
[3] Там же, стр. 189.

был расстрижен, отлучен от церкви и передан светским властям «для наказания возможно более мягкого, без пролития крови», т. е. для сожжения. Казнь произошла первой весной нового века — 17 февраля 1600 г.— на Площади Цветов в Риме.

В ряде вопросов Бруно пошел гораздо дальше Коперника. Коперник придерживался традиционного представления о звездах как источниках света, по своей природе отличающихся от Солнца, причем звезды казались несопоставимыми с Солнцем не только по своей физической природе, совершенно неясной для Коперника, но и по размерам. Впоследствии Кеплер также не видел сходства между звездами и Солнцем, у него было гораздо более туманное, чем у Бруно, представление о природе звезд. Кеплер даже разбирал вопрос, не представляют ли собой звезды граненые блестящие сферы, которые благодаря своему вращению вызывают мерцание света. Бруно пошел дальше Коперника в вопросе о физической природе небесных тел. Он писал, что Коперник интересовался по преимуществу математической стороной астрономии и поэтому оставил в силе некоторые старые традиции, совместимые с математическим аппаратом новой теории, но противоречившие ей по своему духу. К таким старым традициям принадлежит мысль о Солнце как центре Вселенной. Коперник в своей картине мира не вышел за пределы солнечной системы. Он рассматривал всю Вселенную как систему, вращающуюся вокруг нашего Солнца, что было, конечно, коренным переворотом в астрономии. Бруно пошел дальше. Он, в отличие от Коперника, говорил о бесконечной Вселенной, не имеющей центра. Особенно ярко идея бесконечности Вселенной и однородности мирового пространства изложена в книге Бруно «О бесконечности Вселенной и мирах».

### 3. Кеплер

Перейдем к мировоззрению и работам Кеплера. Чтобы показать место Кеплера в истории механической картины мира, мы постараемся проследить динамические идеи, лежавшие в основе кеплеровых законов.

В книге Коперника гелиоцентрическое мировоззрение еще не порвало с представлением об эпициклах и эксцентрах, основанным на традиционной идее совершенства не-

бесных движений, из которой выводились круговые орбиты небесных тел. Кеплер отбросил традиционный критерий «совершенства» и с ним — равномерные круговые движения небесных тел. Вместе с тем по сравнению с Коперником он опирался на новые, гораздо более точные астрономические наблюдения, полученные во второй половине XVI в. Тихо Браге. В результате обработки громадного числа подобных наблюдений Кеплер установил эллиптическую форму планетных орбит. Наряду с идеей круговых орбит нужно было отбросить вторую традиционную идею. От античной науки XVI век унаследовал мысль о равномерном движении планет. Кеплер доказал, что скорость планет изменяется таким образом, что площади, описываемые радиусом-вектором в равные промежутки времени, равны между собой — это второй закон Кеплера. После установления формы орбит и скорости движения планет нужно было связать единой математической формулой расстояния планет от Солнца и скорости их движения. Кеплер сделал это, высказав свой третий закон: квадраты времен обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы средних расстояний этих планет от Солнца.

Кеплер представлял Вселенную ограниченной сферой. В центре мировой сферы находится Солнце — источник движущей силы, гармонии и света. Движущая сила Солнца распространяется на сравнительно небольшое пространство, в котором находятся планеты. Солнце вращается вокруг своей оси и увлекает благодаря этому планеты, распространяя вокруг себя движущие силовые «нити». Планеты и неподвижные звезды, расположенные около границ сферической Вселенной, находятся на связанных друг с другом определенной пропорциональностью расстояниях от Солнца. Радиус орбиты Сатурна, самой крайней из известных тогда планет, иначе говоря, радиус увлекаемой Солнцем подвижной сферы, в две тысячи раз больше, чем радиус самого Солнца. Радиус сферы неподвижных звезд, т. е. границы мира, равен четырем миллионам радиусов Солнца. Космос наполнен эфирным веществом, которое сгущается и образует кометы и новые звезды.

Одной из основ такой картины мира были представления Кеплера о свете — невесомой материи, которая с бесконечной скоростью распространяется во все стороны

прямолинейно от светящихся тел, причем сила света убывает пропорционально квадрату расстояния. Еще большее значение имели воззрения Кеплера на тяготение и магнетизм. Кеплер в этом вопросе отчасти шел за Гильбертом. Для последнего тяжесть — это стремление соединить разрозненные части, причем последние движутся по кратчайшим направлениям. Гильберт говорил отнюдь не о всемирном тяготении. Причиной движения служит особая субстанциальная форма, которая присуща каждому небесному телу; силы, притягивающие тела к Солнцу, звездам и Земле, различны для каждого небесного тела.

Кеплер отбросил телеологические рассуждения о стремлении тел к общему источнику, где они «остаются в покое, огражденные от всякой опасности». Соответственно исчезает и специфичность силы тяготения к каждому небесному телу. Одна и та же сила заставляет тяготеть друг к другу и части Луны, и части Земли. Таким образом, тяготение становится универсальной характеристикой вещества. Отсюда вытекает, что элементы вещества связаны взаимным тяготением. Если у Гильберта части небесного тела тяготели к его центру, то у Кеплера они тяготеют друг к другу. Кеплер отказался от традиционного представления о тяготении как стремлении к нормальному, естественному, законному месту каждого тела во Вселенной. Его тяготение направлено вообще не к месту, а к телу. Эту сторону учения о тяготении Кеплер излагал особенно подробно и отчетливо.

Движущая сила Солнца, согласно Кеплеру, распространяется в плоскости эклиптики; поэтому если представить себе концентрические круги, которых достигает поток двигательной силы, то одна и та же сила будет распределяться по все большим дугам, а длины дуг прямо пропорциональны радиусам. Поэтому Кеплер и думал, что движущая сила Солнца убывает пропорционально первой степени расстояния. Таким образом, динамические идеи Кеплера прямо вытекают из его физических гипотез. Эти физические гипотезы по своему духу были еще в значительной мере средневековыми. Для Кеплера характерно сближение различных понятий по чисто внешним, иногда словесным ассоциациям. Если алхимики приписывали красной окиси ртути особое химическое могущество потому, что пурпур — это символ власти, то и Кеплер полагал, будто в «музыке сфер» гармонические числа Зем-

ли соответствуют нотам «фа» и «ми», а эти названия суть первые слоги слов fames (голод) и miseria (бедность), из чего следует, что Земля — юдоль голода и нищеты. Кеплер во многом примыкал к научному мышлению средневековья с его некаузальными символическим и мистическим «влияниями» и всем арсеналом магических понятий. Гипотезы, положенные Кеплером в основу его динамики, зачастую имеют именно такой средневековый характер. В Солнце заключена «животная сила», которая проявляется во вращении Солнца вокруг оси: благодаря вращению Солнце распространяет вокруг себя некоторую силу, увлекающую планеты и заставляющую их вращаться вокруг Солнца. Эта сила принципиально не отличается от магнетизма и убывает обратно пропорционально расстоянию.

Однако динамика Кеплера, включая явно средневековые и архаичные для начала XVII в. элементы, в целом уходит далеко вперед. Кеплер хотел выйти за пределы чисто кинематической картины мира и указать объективные причины ускорений. Именно поэтому Кеплер рвет с кинематикой равномерных движений, которую Коперник взял у Птолемея. Он ищет причины неравномерного космического движения и находит их в движущей силе Солнца, но это не ньютоновская центростремительная сила, а сила, заставляющая планету двигаться по орбите, увлекающая ее, втягивающая в эллиптическое движение. Чтобы прийти к правильному взгляду, Кеплеру не хватало идеи инерции. Инерция Кеплера — это косность покоя, об инерционном движении Кеплер не знал. Он думал, что движение, не поддерживаемое силой, прекратится, и искал силу, которая поддерживает движение небесных тел.

Небесная механика XVII в. кончила знаменитой декларацией Ньютона, направленной против физических гипотез, но начала с настойчивых поисков физических причин движения небесных тел. Кеплер стремился понять, почему между орбитами небесных тел существует известное отношение, почему еще более четкая пропорциональность существует между периодами обращения планет и величиной их орбит, откуда взялась гармония мирового порядка. Поэтому его не удовлетворяли самые подробные и точные описания количественных соотношений между элементами планетных орбит. Он стремился услышать некоторую универсальную гармонию, «музыку сфер»,

управляющую всеми явлениями природы. Он не нашел тех механических законов, которые каузально объяснили бы движение небесных тел и объединили их со всеми прочими явлениями природы. Кеплер не знал законов инерции и падения тел, открывающих путь в область универсального механического объяснения различных явлений. В поисках универсальных законов, охватывающих всю природу, он пришел к идее некоторых гармоничных числовых отношений. Отсюда пифагорейское представление о числовых пропорциях как душе мира. Для Кеплера единая мировая гармония управляет всеми явлениями, и если отыскать в движениях небесных тел законы этой гармонии, то тем самым можно предвидеть подчиненные той же гармонии земные явления вплоть до исторических событий и судеб отдельных людей. Здесь истоки астрологических тенденций в мировоззрении Кеплера. Кеплер так много занимался астрологией потому, что она лучше, чем астрономические наблюдения, оплачивалась германскими императорами и впоследствии Валленштейном. Но вряд ли к этому сводится все дело. В мировоззрении Кеплера идея механического объяснения мира еще не противостояла последовательно и резко средневековой мистике. Историческая ограниченность знаний Кеплера была основой туманных грез, скрывших рациональное содержание его законов от многих, отчасти даже от Галилея. Тем не менее стремление Кеплера к динамическому объяснению движения планет было отнюдь не средневековой тенденцией; оно явно перекликается с современной наукой. Именно эта тенденция лежала в основе законов Кеплера, положивших начало небесной механике нового времени.

Первая научная работа Кеплера «Космографическая тайна» (1596 г.) посвящена доказательствам коперниканства при помощи геометрической схемы правильных многогранников. Кеплер хотел найти причину, почему вокруг Солнца обращается только шесть планет и почему эти планеты обладают именно такими, а не другими орбитами. Рисуя картину развития солнечной системы, современная наука объясняет совпадение плоскостей орбит планет и другие факты, интересовавшие в свое время Кеплера. Но Кеплер был очень далек от эволюционного воззрения на космос. Вопрос о причинах, обусловливающих определенные расстояния между планетами, по существу,

как это сейчас видно, адресуется будущему. Это один из тех вопросов, которые связывают прошлое науки с будущим; ведь их связь меньше всего сводится к сходству позитивных решений, она в первую очередь состоит в новых ответах на старые вопросы.

Однако *решение* этой проблемы в первой работе Кеплера подчинено средневековым, мистическим, чисто словесным туманным построениям. Словесные схоластические спекуляции в пифагорейском духе, представление о «душе» небесных тел заполняют страницы «Космографической тайны». Содержание этой книги чрезвычайно сложно, запутанно и противоречиво. В основном книга посвящена геометрическому закону, управляющему расстояниями между орбитами планет.

«Орбита Земли,— пишет Кеплер,— дает нам сферу, являющуюся мерой для всех других. Опишем вокруг этой сферы додекаэдр. В сфере, окружающей этот додекаэдр, лежит путь Марса. Опишем вокруг сферы Марса тетраэдр. Шаровая поверхность, описанная вокруг этого тетраэдра, заключает в себе орбиту Юпитера. Опишем вокруг этой последней куб; описанная вокруг него сфера содержит в себе орбиту Сатурна. Далее построим внутри земной сферы икосаэдр; вписанная в него шаровая поверхность заключает в себе путь Венеры. Если внутри ее сферы вписать октаэдр, он охватывает сферу Меркурия».

Так как пятью перечисленными многогранниками (додекаэдр, тетраэдр, куб, икосаэдр, октаэдр) исчерпываются правильные фигуры, которые можно вписать и вокруг которых можно описать шаровую поверхность, то и планет, по мнению Кеплера, могло быть только шесть. Во времена Кеплера и было известно всего шесть планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер и Сатурн; между их сферами Кеплер и поместил пять правильных многогранников.

Здесь следует остановиться, чтобы проиллюстрировать одну из основных идей этой книги, связанную с ретроспективной, исходящей из современных идей оценкой физических воззрений прошлого. Речь идет о следующем.

С древности до начала XVII в. в физике господствовало представление о движении, направленном из «чего-то» во «что-то», причем эти «что-то» разделены конечным интервалом. Движение рассматривали не от точки к соседней точке, на последовательных бесконечно малых от-

резках (как мы сказали бы сейчас — в дифференциальном представлении), а интегрально. У Аристотеля падение тел определяется не дифференциальным законом, в котором фигурирует мгновение скорости и ускорения, а интегральной схемой естественных мест, к которым стремятся тяжелые тела. На круговых орбитах движение тел определяется не дифференциальным законом равенства мгновенных абсолютных скоростей, как у Галилея (впрочем, и у последнего такое представление примыкало к традиционному), а «совершенством» круговых орбит.

Поскольку интеграл — это предел суммы бесконечно малых величин, выражение «интегральное представление» не совсем точно передает смысл аристотелевой трактовки движения. Но представление, не расчлененное на точки и мгновения, в историческом аспекте является вопросом, адресованным будущему, и в этом смысле его можно сблизить с позднейшим понятием интегрального закона.

Кеплер установил такие интегральные закономерности движения, из которых прямо вытекало в качестве следующего шага дифференциальное представление о движении. Если орбита планеты — эллипс, то кривая ее меняется от точки к точке. В силу законов Кеплера, меняется и абсолютная скорость планеты. Но сам Кеплер не сделал следующего шага, не нашел действительных закономерностей, определяющих движение планет от точки к точке и от мгновения к мгновению.

Для генезиса законов Кеплера существенное значение имело несовпадение орбит, указанных в «Космографической тайне», с орбитами, указанными в книге Коперника.

Обнаружив это расхождение, Кеплер приступил к систематическому просмотру данных Коперника. Это была титаническая работа, и именно она привела к открытию законов небесной механики.

В первую очередь Кеплер исправил Коперника в вопросе о центре мира. В схеме Коперника центр мира был помещен не в Солнце, а в некоторой идеальной точке, центре орбиты Земли. Кеплер утверждал, что центр земной орбиты, отстоящий от Солнца на расстоянии, равном эксцентриситету земной орбиты, не может служить действительным центром Вселенной. Вообще, как мы видели, у Кеплера небесные тела обращаются не вокруг матема-

тических точек, а вокруг физических тел. Такое воззрение тесно связано с динамическими тенденциями Кеплера. Руководимый этой идеей, Кеплер и пришел впоследствии к представлению об орбитах планет как об эллипсах с Солнцем в одном из фокусов.

После «Космографической тайны» основным содержанием всей жизни Кеплера стал пересмотр небесной механики, которую Коперник не тронул, т. е. теории эпициклов и круговых равномерных движений, замена ее новым учением о неравномерном эллиптическом движении планет. Задача была выполнена с помощью наблюдений Тихо Браге и собственных Кеплера. На основе трудно представимого по объему и напряженности труда Кеплер показал, что Марс движется вокруг Солнца по эллипсу. Это заключение высказано в знаменитой книге Кеплера «Новая астрономия», вышедшей в 1609 г. На ее титульном листе напечатано: «Новая астрономия, основанная на познании причин, или физика неба, содержащая исследования движений звезды Марса по наблюдениям благороднейшего мужа Тихо Браге; по распоряжению и на средства Рудольфа II римского императора и проч. в течение многих лет напряженного изучения, разработанная в Праге математиком его величества Иоганном Кеплером». В этой книге установлен первый закон Кеплера — эллиптическая форма планетных орбит.

Второй закон Кеплера, изложенный в той же книге, также вытекал из физических идей. Во всей своей кинематике Кеплер исходил из определенных физических гипотез, так же как это делал Ньютон 50—80 лет спустя, только Кеплер не скрывал физических гипотез, лежащих в основе его закона. Из отождествления движущей силы Солнца с магнетизмом, распространяющимся в плоскости, вытекает обратная пропорциональность между притяжением Солнца и первой степенью расстояния. Отсюда следует, что планета, увлеченная солнечным притяжением, движется по эллиптической орбите со скоростью, обратно пропорциональной расстоянию от Солнца. Чем больше планета отдаляется, тем медленнее она движется и тем соответственно больше времени необходимо, чтобы пройти некоторое расстояние в этой части орбиты. Но в этой же части орбиты планета дальше всего от Солнца, и, следовательно, радиус-вектор — больше. Таким образом, когда планета приближается к точке максимального рас-

стояния от Солнца, радиус-вектор растет, а скорость в той же пропорции убывает, следовательно, время растет пропорционально длине радиуса-вектора.

Третий закон Кеплера изложен в книге «Гармонии мира» (1619 г.). Кеплер считал эту книгу продолжением «Космографической тайны». Действительно, здесь снова разбирается вопрос о расстояниях планет от Солнца, геометрии планетных орбит. Однако в «Гармониях мира» речь идет о средних расстояниях, так как орбиты оказались эллиптическими. Далее Кеплер здесь, в отличие от «Космографической тайны», выходит за пределы геометрии и связывает расстояние планет от Солнца с временем их обращения. Это весьма важный этап генезиса науки нового времени.

Альберт Эйнштейн сказал как-то, что его интересует вопрос: мог ли мир быть создан иначе, чем он создан в действительности; определены ли неэмпирическим образом мировые константы, можно ли их однозначно вывести из некоторого единого процесса. Этот вопрос — от чего зависят, как могут быть выведены и лишены своего эмпирического характера мировые константы — задавал себе и Кеплер. Он имел в виду средние радиусы планетных орбит.

Вопрос не получил ответа и в наше время. Но уже в XVII в. постановка его коренным образом изменилась. Конкретная структура мира объяснялась сначала (у перипатетиков и в «Космографической тайне») той или иной *статической, чисто пространственной схемой*, а потом (у Кеплера в «Гармонии мира» и у Галилея) — *кинематической схемой* — моделью *движений* небесных тел. Мы остановимся на указанном переходе в связи с характеристикой идей Галилея.

В 1618—1620 гг. Кеплер выпустил систематический курс коперниканской астрономии, где законы, найденные при наблюдении Марса, обобщаются на движения всех планет и их спутников. В этой книге гораздо меньше мистических концепций, чем в предыдущих, но тем интереснее упомянуть о следующем факте. Кеплер рассматривает вопрос об абсолютном расстоянии между планетами и Солнцем. При этом он исходит из такой мысли: Земля — местопребывание существ, способных измерять, следовательно, ее размеры должны быть естественной мерой космических расстояний и величины космических тел, поэто-

му объем Солнца во столько раз больше объема Земли, во сколько расстояние до Солнца превышает радиус Земли. Здесь опять мы встречаемся с тенденцией Кеплера найти какую-то связь между космическими константами. Что же касается «природы, которая стремится упростить и облегчить изучение», то мы встретимся с ней и позже, у Галилея, правда в гораздо более рафинированном виде. У Галилея подобные рассуждения вкраплены в основную ткань причинно-механического исследования. У Кеплера, напротив, элементы причинного исследования тонут в нагромождении фантазий в средневековом духе. Для логической схемы научного развития эти фантазии не играют существенной роли, но для истории естествознания как общественного процесса они крайне важны. Кеплер не мог оказать того воздействия на самый характер научного мышления, на отношение к природе и на ее изучение, какое оказал Галилей — родоначальник механического естествознания. Кеплер не мог отыскать динамические принципы, которые дали бы рациональное объяснение планетных движений. Это не должно исказить историческую перспективу и помешать оценке великих открытий Кеплера, которые вошли в исторически инвариантное содержание новой механики.

## 4. Мировоззрение Галилея

Научно-технические интересы Галилея были навеяны средой и появились у него с самой ранней юности. Учителем Галилея был Остилио Риччи, забытый сейчас представитель прикладной механики и математики XVI в. Риччи обучал сыновей знатных флорентийских фамилий художественной и инженерной технике. Во флорентийской национальной библиотеке хранятся 23 листа с конспектами лекций, которые показывают, чему обучался молодой Галилей у Риччи. Последний познакомил Галилея с механикой и математикой как совокупностью сведений, необходимых для практики. По-видимому, он развивал уже существовавший у Галилея интерес к технике, который отмечали его ранние биографы и без убедительных оснований отвергали позднейшие исследователи.

Под руководством Риччи Галилей изучал военно-инженерное дело, наблюдал возведение крепостей, сооружение

водопроводов, регулирование рек, прокладку улиц во Флоренции. Впоследствии он сам написал два трактата по фортификации, а в 1610 г. сообщил о своем намерении написать ряд книг, которые служили бы наставлениями по фортификации и другим отраслям военного дела, связанным с практическим применением механико-математических знаний.

Военно-инженерные и артиллерийские проблемы всегда были предметом научных интересов Галилея; позже к ним прибавились гидротехнические задачи. Вообще производственно-технические корни творчества Галилея обнаружить легко. Но ими не исчерпываются истоки мировоззрения и открытий Галилея. С идеями, навеянными земной прикладной механикой, Галилей подошел к проблемам космоса. Поспешим оговориться: Галилей отнюдь не соединил земную механику с небесной — это сделал Ньютон; у Галилея не было для этого таких необходимых предпосылок, как понятие прямолинейного инерционного движения и закона тяготения. Но Галилей применил к изучению космоса новый, навеянный техникой метод научного мышления и дал образец нового стиля научного исследования.

Галилей провозгласил суверенитет причинности в науке. Правда, он иногда отказывался от поисков пока еще недоступного физического объяснения некоторых явлений, говорил об ограничении исследования законами явлений без проникновения в их причины. Но для Галилея причинное объяснение природы никогда не переставало быть основной задачей исследования. Подчас Галилей ограничивал научное исследование учением о двойственной истине. Это учение выделяло богословию и науке различные области, причем богословие не вмешивалось в область науки, а наука не навязывала своих выводов богословию. Такая форма компромисса между религией и наукой ничего общего не имела с осиандеровским кондиционализмом. Ученые, говорившие о двойственной истине, не думали, что наука имеет дело с фиктивными объектами. Напротив, они утверждали, что выводы науки — объективная истина. Смысл учения о двойственной истине состоял в том, что наука возводила стену между своей областью и областью, где царила церковная догма. Во всяком случае, сама наука, по мнению Галилея, должна быть подчинена принципу причинности. Галилей ввел в научное сознание идею бес-

конечного приближения к объективной истине на основе механического объяснения природы.

Бесконечность познания вытекала у Галилея из бесконечности природы. На склоне лет, подводя итог своим астрономическим работам, Галилей указал, как на основную свою заслугу, на колоссальное расширение сферы познания Вселенной. Действительно, и открытие телескопа, и основные идеи Галилея означали коренной поворот в мировоззрении: объектом науки, не натурфилософских догадок, не схоластических построений, а именно науки, становится безграничная природа. В январе 1638 г., сообщая о своей слепоте, Галилей писал:

«Вы можете себе представить, как я горюю, когда я сознаю, что это небо, этот мир и Вселенная, которые моими наблюдениями и ясными доказательствами расширены в сто и в тысячу раз по сравнению с тем, какими их считали люди науки во все минувшие столетия,— теперь для меня так уменьшились и сократились» [4].

Отметим: речь идет не о *бесконечно большой* Вселенной. Конечная Вселенная Аристотеля стала больше «в сто и в тысячу раз». Бесконечность Вселенной, которая открывает дорогу бесконечному познанию,— это то, что называли *интенсивной бесконечностью,* переход к бесконечному числу бесконечно малых событий, из которых составлена совокупность движений,— действительная основа универсальной гармонии бытия.

Во всяком случае, для Галилея впереди бесконечное поле исследования. Однако Ольшки неправ, полагая, что бесконечность науки неизбежно вызывает чувство подавленности. «Для тех, кто привык смотреть в корень вещей, Галилей открыл неразрешимую мировую загадку и бесконечно простирающуюся во времени и пространстве науку, безграничность которой должна была повлечь за собой чувство и осознание человеческого одиночества и беспомощности» [5].

Дело не в субъективных ощущениях и настроениях современного ученого, встретившегося с отсутствием в науке окончательных догматических решений. Ученый, связавший свою деятельность с всепобеждающим и бесконечным общественным и научным прогрессом, не испытывает

[4] G. Galilei. Le Opere. Ed. Naz., v. XVII. Firenze, 1937, p. 247.

[5] Л. Ольшки. История научной литературы на новых языках, т. III. М.— Л., 1933, стр. 82.

ощущения одиночества и беспомощности. Бесконечность познания была источником глубокого и яркого оптимизма, окрашивавшего мировоззрение Галилея. Обращаясь к своим многочисленным слушателям, читателям и корреспондентам, Галилей говорил, что наука — это не сумма твердых, раз навсегда установленных догматов, а живой процесс, уходящий в бесконечность. По словам Галилея, мы обладаем лишь небольшой частицей истины и природа открывает перед нами безграничное поле для дальнейшего исследования. Но Галилей говорил об этом спокойным и радостным тоном. Он утверждал абсолютную объективность научной истины. Мы обладаем небольшими знаниями, но эти знания соответствуют объективной действительности, и они будут обогащаться и уточняться на основе простого, рационального, доступного всем людям научного метода.

Противники Галилея либо объявляли видимое (геоцентрическое) движение абсолютной реальностью, либо вообще отрицали объективный характер научных законов. Таков метафизический взгляд на науку: либо сумма окончательных догматов, либо цепь заблуждений, имеющих лишь условную ценность. И та и другая концепция может быть основой глубокого пессимизма в отношении перспектив *развития* науки. Напротив, концепция Галилея — это оптимистическая проповедь всепобеждающего научного прогресса, не имеющего границ, бесконечного, как бесконечна сама природа. По мнению Галилея, человеческий разум экстенсивно, т. е. по количеству знания, всегда будет охватывать бесконечно малую часть истины, так как природа бесконечна, а знания конечны. Но интенсивно, т. е. по уровню объективной достоверности, разум абсолютно постигает природу. Эта мысль, упомянутая в качестве особо одиозной в инквизиционных актах процесса 1633 г., была высказана Галилеем в следующей декларации, которая, смело можно сказать, не имеет аналогий в истории науки XVII в.:

«Экстенсивно, т. е. по отношению ко множеству познаваемых объектов, а это множество бесконечно, познание человека — как бы ничто, хотя он и познает тысячи истин, так как тысяча по сравнению с бесконечностью — как бы нуль; но если взять познание интенсивно, то поскольку термин „интенсивное“ означает совершенное познание какой-либо истины, то я утверждаю, что человеческий ра-

зум познает некоторые истины столь совершенно и с такой абсолютной достоверностью, какую имеет сама природа...» [6].

Математика, говорил далее Галилей, раскрывает связь явлений, их причинную обусловленность, «приходит к пониманию их необходимости, а высшей степени достоверности не существует».

Объективной, истинной причиной явлений природы служит у Галилея единая, тождественная себе материя, лишенная качественных, вторичных свойств. При всей своей ограниченности эта идея для XVII в. прогрессивна, она направлена против перипатетических качественных объяснений. Последние представляются Галилею чисто словесными обозначениями, не приближающими нас к познанию причин. Средневековые эпигоны Аристотеля при каждой встрече с незнакомыми явлениями тут же предполагали наличие специфического качества, которое именно и состоит в способности вызвать данное явление. По словам Галилея, метод перипатетиков сводит науку к придумыванию новых слов, причем эти слова, не решая никаких проблем, лишь обозначают проблемы.

Следующее поколение встречало пережитки перипатетических теорий насмешками Мольера, который вложил в уста бакалавра-перипатетика знаменитый ответ на вопрос, почему опий усыпляет: «Потому, что есть в нем усыпительная способность, природа которой — усыплять чувства...»

Подлинное объяснение явлений природы, говорил Галилей, должно показать в их основе перемещение частей бескачественной единой материи. Состояние науки в XVI—XVII вв. было таково, что единство мира могло быть принято лишь как механическое единообразие. Вместо качественных различий *нужно было включить в научное* мировоззрение чисто количественные различия тождественных по своей природе и свойствам элементов. Мало того, нужно было подчинить всю науку механическому сведению всех явлений природы к количественному процессу, а именно к перемещению качественно однородных элементов.

Эта тенденция, получившая свое завершение в физике Декарта, существовала уже у Кеплера, несмотря на то

[6] Галилео Галилей. Избр. труды, т. 1. М., 1964, стр. 201.

что Кеплер по своим натурфилософским воззрениям во многом был во власти средневековых идей. Кеплер писал: «Там, где Аристотель усматривает между двумя вещами прямую противоположность, лишенную посредствующих звеньев, там я, философски рассматривая геометрию, нахожу опосредствованную противоположность; так что там, где у Аристотеля один термин: „иное", у нас два термина: „более" и „менее"» [7].

Механическое естествознание отбросило не только перипатетические скрытые свойства, но, в сущности, и все качественные различия в природе, сведя их к чисто количественным. Галилей пошел по этому пути гораздо дальше, чем Кеплер. В своем учении о материи, как и в астрономических воззрениях, он отказался от качественного разграничения элементов вещества. В «Пробирных весах» («Il Saggiatore») он писал: «Никогда я не стану от внешних тел требовать чего-либо иного, чем величина, фигура, количество, и более или менее быстрые движения для того, чтобы объяснить возникновение ощущений вкуса, запаха и звука; я думаю, что если бы мы устранили уши, языки, носы, то остались только фигуры, числа, движения, но не запахи, вкусы и звуки, которые, по моему мнению, вне живого существа являются не чем иным, как только пустыми именами» [8].

Далее Галилей высказывает в высшей степени значительную с исторической точки зрения мысль, в которой сплетаются корни таких важнейших научных идей XVII в., как неуничтожаемость вещества, однородность материи и сведение качественных различий к конфигурации элементов материи.

«Я никогда не мог представить себе,— пишет Галилей,— такого превращения веществ друг в друга, при котором одно тело признается уничтоженным, и из него получается другое тело, совершенно отличное от первого. Я считаю возможным, что превращение сводится просто к изменению взаимного расположения частей, причем ничто не уничтожается и ничего нового не нарождается».

Литературная форма сочинений Галилея тесно связана с характером его научных идей. Галилей — один из творцов классической итальянской прозы. Это объясняется, с

---

[7] J. Kepler. Opera omnia, t. 1. Frankfurt, 1858, p. 423.
[8] G. Galilei. Le Opere. Ed. Naz., v. VI. Firenze, 1933, p. 350.

одной стороны, специфическими путями развития итальянской науки XVII в. и, с другой — специфическими линиями в развитии художественной прозы того времени. Галилей решительно отказался от собирания и пересказа сведений, почерпнутых в старых античных сочинениях и в трудах отцов церкви, и положил в основу науки наблюдение и самостоятельный анализ явлений природы. Соответственно, искусственная риторика, традиционная форма выражения традиционных мыслей уступила место живой и образной речи человека, как бы впервые открывшего глаза и с пристальным вниманием всматривающегося в окружающий мир.

Галилей, подобно ряду других новаторов в науке и искусстве, подошел к миру как первый наблюдатель, отбросив традиционные воззрения, и мир засверкал перед его глазами чистыми и новыми красками. Впоследствии это умение глядеть на мир без предвзятых схем превратилось в ограниченный эмпиризм, который в XVIII—XIX вв. сам стал традицией. У Галилея отказ от априорных схем был не только и даже не столько сформулированным методологическим требованием, вроде ньютоновских «Правил философствования», сколько специфическим стилем научного творчества, из которого вытекали свежесть и яркость языка. До Галилея в итальянской прозе господствовали канонические формы, передававшие традиционные чувства и мысли. Напротив, литературный стиль Галилея был приспособлен к изложению оригинальных идей. В итальянской литературе благодаря Галилею бессодержательные, многословные и напыщенные периоды сменились сдержанным, строгим стилем. Галилей и его последователи поставили литературную форму на службу богатому и новому содержанию своих трудов.

Традиционный стиль, ставший самодовлеющим набором литературных штампов, не был пригоден для передачи новых идей.

Галилей не любил аллегорий, которые были чрезвычайно распространены в современной ему литературе. Для него художественные образы выражают каузальное, рациональное содержание. Аллегория есть нечто крайне враждебное причинности, она сближает явления внешним образом, подобно магии. Поэтому аллегории были уместны в алхимии, астрологии и вообще в некаузальной литературе средневековья. Для Кирхера красный цвет — символ

пурпурного одеяния властителей — был поводом, чтобы приписать магниту, завернутому в красную ткань, повышенную силу. Новому естествознанию подобные внешние, чисто словесные символически-аллегорические построения глубоко враждебны.

Галилей рвал и с другой литературной традицией. Писатели того времени любили украшать свои книги отступлениями и причудливыми словесными орнаментами. Галилей был врагом подобной литературности и считал преступлением против хорошего вкуса выставлять напоказ литературную эрудицию.

Наука для Галилея — это не сумма разнообразных почерпнутых из книг сведений, а строгое и последовательное объяснение фактов. Поэтому эклектическая эрудиция схоластической литературы чужда основателю механического естествознания. Галилей отказывался нанизывать случайные наблюдения, выдержки из старых книг, риторические отступления, внешние сближения и т. д., как это делали его противники.

Основа литературного стиля Галилея — новый тип научного мышления. Отныне наука имеет дело с бесконечной Вселенной и состоит в бесконечном, никогда не претендующем на окончательный характер своих выводов познании природы. Поэтому раз навсегда установленная догматика перестает быть содержанием науки, а вместе с ней научной литературе становятся чужды ссылки на авторитеты и тот чисто литературный подход к действительности, который почти безраздельно господствует в средние века. В средневековой науке эрудиция заменяла исследование, и этому соответствовал перенос одних и тех же образов из одной книги в другую. При таком переносе литературные штампы становились неотъемлемым и основным содержанием книг. Таким образом, борьба Галилея против книжности и бессодержательной вычурности литературного стиля связана с основными идеями его мировоззрения. Таинственная мистика аллегорий должна была смениться точным и прозрачным литературным стилем, потому что новый стиль научного мышления состоял в рациональном, причинном *объяснении явлений природы*. Это рациональное объяснение было доступно рядовым людям, не посвященным в жреческий язык цеховой науки. Для средневековья устройство природы было тайной божества. Эта тайна, сообщенная людям откровением и ком-

ментированная отцами церкви, давала окончательный ответ на все вопросы науки. Для Галилея, напротив, наука состояла в применении к явлениям природы понятий, найденных эмпирической практикой мануфактур, рациональных понятий, доступных пониманию любого человека. Именно в этом — основные корни реформы, которую произвел Галилей в стиле не только научной, но и художественной прозы.

Следует подчеркнуть, что стиль Галилея соответствует определенному периоду в развитии естествознания, периоду, когда оно борется за общественное признание, апеллирует к новым кругам общества и очень далеко от законченной, систематизированной формы. Декарт говорил, что стиль Галилея соответствует его методу: «Мне кажется, что ему недостает много, так как он постоянно делает отступления и не останавливается для того, чтобы выяснить до конца какой-нибудь вопрос; это показывает, что он не изучал их систематически и что, не исследуя первопричину природы, он искал только оснований некоторых отдельных явлений, и что, следовательно, он строил без фундамента». Стройное здание картезианской физики, где из движения материи систематически, подчас при помощи фантастических гипотез, выводились все детали мироздания, было для картезианцев доказательством истинности механического объяснения природы. Живые арабески Галилея выполняли другую историческую задачу. С этой стороны произведения Галилея очень стройны. Возьмем «Диалог о двух системах мира». Вначале разбиваются предрассудки против суточного вращения Земли; затем доказывается годичное движение Земли; после этого излагается система Коперника, и, наконец, когда читатель подготовлен к безоговорочному признанию коперниканства, Галилей приводит самое убедительное, с его точки зрения, доказательство — теорию приливов.

В «Диалоге» есть отступления, которые в трудах ученых следующего поколения уже не встречались. Вспомним начало третьего дня, когда простодушный Симпличио рассказывает, как он по дороге во дворец Сагредо застрял со своей гондолой из-за спада воды в канале во время отлива. Юмористическое внешнее изображение запыхавшегося Симпличио, юмористическая внутренняя ситуация (перипатетика задержало явление, которое опровергает его идеи), спокойный, слегка насмешливый тон Сагредо и

Сальвиати, беседующих о Симпличио в то время, как он ждет прилива,— все это создает то отношение к Симпличио, которое необходимо Галилею, чтобы развернуть психологический подтекст «Диалога». После этого эпизода тон беседы меняется, центр тяжести переносится на положительное изложение.

Из содержания и исторической задачи работ Галилея вытекает популярность изложения. От зашифрованной ремесленной рецептуры, астрологии, алхимии, средневековой магии, от скрытых свойств средневекового перипатетизма веяло тайной. Соответственно и язык алхимии, астрологии и всей ортодоксальной средневековой литературы был таинственным. Напротив, механическое естествознание провозгласило познаваемость природы, отрицало таинственные силы и истолковывало явления при помощи ясных механических аналогий, взятых из практики, из техники, из земного мира блоков, мельничных колес и мануфактурных станков — мира, доступного непосвященным, простым людям. Ясность была требованием механического естествознания.

Значительная часть работ Галилея написана на родном языке. Галилей сам говорил, что он пишет по-итальянски, во-первых, для того, чтобы каждый человек мог прочитать его книги, а во-вторых, чтобы продемонстрировать доступность мира человеческому разуму обыкновенных людей, не вкусивших от плодов схоластики.

## 5. «Диалог о двух системах мира»

Наибольший общественный резонанс вызвали астрономические открытия и сочинения Галилея. Известность Галилея в широких кругах Италии и всей Европы началась с открытия им спутников Юпитера, кратеров Луны, звездной природы Млечного Пути, фаз Венеры и солнечных пятен при помощи телескопа, изобретенного в Голландии в первом десятилетии XVII в.

В ночь на 7 января 1610 г. оптический прибор был впервые направлен на звездное небо. Галилей обнаружил кратеры и хребты Луны, разглядел бесчисленное скопление звезд, образующих Млечный Путь, который раньше казался людям сплошной светлой полосой, увидел вблизи Юпитера мелкие звездочки, которые в следующую ночь сместились и таким образом оказались спутниками Юпи-

тера. Утром 7 января Галилей сообщил о своих открытиях флорентийскому герцогу. После этого он начал «Звездный вестник» («Sidereus Nuncius»), который был опубликован в Венеции два месяца спустя. Здесь описывается ландшафт Луны, который раскрылся перед глазами Галилея, когда он обратил телескоп к спутнику Земли. Галилей писал, что вся армия философов считала Луну совершенно сферической и гладкой, а телескоп показал, что ее поверхность неровная, шероховатая, испещренная углублениями и возвышениями и не отличается в этом отношении от поверхности Земли. Далее Галилей рассказывал, что с помощью телескопа он наблюдал в десять раз больше звезд, чем их можно увидеть простым глазом. Галилей с насмешкой вспоминал о схоластических дискуссиях по поводу природы Млечного Пути. Он оказался скоплением звезд. Галилей подчеркивал, что при помощи телескопа обычный человеческий разум, не вооруженный тонкими хитросплетениями схоластов, может получить абсолютно достоверное представление о строении звездного мира. Эта нота часто звучит в «Звездном вестнике». Наконец, Галилей рассказывает об открытии спутников Юпитера.

Все эти открытия способствовали распространению и физическому пониманию системы Коперника. Приведем в качестве примера наблюдения Луны. Картина ее поверхности имела принципиальное значение для научного мировоззрения. Традиционная концепция не допускала сходства между Землей и небесными телами. Напротив, система Коперника сближала Землю с другими планетами, так как приписывала всем планетам одно и то же движение — вращение вокруг Солнца. Но коперниканство учитывало не только это механическое, вернее кинематическое, сходство между Землей и другими небесными телами. Существовала другая, физическая сторона. Второе поколение коперниканцев, в лице хотя бы Джордано Бруно, видело эту физическую сторону: тождественность физической природы Земли и других небесных тел. Эта мысль оставалась натурфилософской догадкой, пока Галилей при помощи телескопа не увидел поверхность Луны, которая оказалась похожей на земной ландшафт. Картина, которую показал Галилей, была таким наглядным доказательством физического тождества Земли и небесных тел, какого никогда не существовало в догалилеевской астрономии. Здесь речь шла не о каких-либо математических выкладках, а о

непосредственном наблюдении природы небесных тел. Разумеется, такое доказательство было рассчитано не только на цеховых ученых, но и на более широкий круг людей, естественнонаучные представления которых были тесно связаны с общественными идеями и с общественной борьбой. Если каждый человек, независимо от его математической и астрономической подготовки, может при помощи телескопа увидеть, что Луна, представительница неба, принципиально не отличается от грешной Земли, то падает священный принцип иерархии неба и Земли вместе с религиозными, моральными и политическими выводами, которые церковь делала из этого принципа.

Здесь есть и позитивная, собственно научная сторона дела. Физические доказательства гелиоцентризма, идея физической однородности Земли и неба, мысль о подчинении движения земных предметов и небесных тел одним и тем же законом — все это и было основой единой научной картины мира, создание которой совпадает с началом современного естествознания.

«Звездный вестник» принес Галилею широкую известность и пробудил необычный интерес к астрономическим наблюдениям. Возвратившись во Флоренцию и поступив на службу к Козимо Медичи в качестве придворного математика, Галилей продолжал астрономические наблюдения при помощи телескопа и открыл фазы Венеры и солнечные пятна. Открытие фаз Венеры казалось Галилею решительным, неоспоримым аргументом в пользу коперниканства. Он мог уже заранее, исходя из теоретических расчетов, предполагать, что из гелиоцентрической системы мира и факта вращения Венеры вокруг Солнца вытекает возможность увидеть картину, аналогичную фазам Луны, вращающейся вокруг Земли. Галилей действительно увидел в телескоп серп планеты.

«Фазы Венеры,— писал Галилей,— не оставляют никакого сомнения, как происходит движение Венеры; мы с абсолютной необходимостью приходим к выводу, который соответствует мнению пифагорейцев и Коперника; она обращается вокруг Солнца, подобно и другим планетам, также обращающимся вокруг Солнца, как вокруг центра» [9].

Собственно говоря, фазы Венеры не служат строгим доказательством гелиоцентризма. Но для физической сто-

[9] G. Galilei. Le Opere. Ed. Naz., v. V. Firenze, 1932, p. 99.

роны картины мира это явление очень важно: фазы Венеры доказывают, что эта планета светит отраженным светом, подобно Луне. Отсюда вытекало, что планеты физически сходны с Луной. Луна же благодаря открытиям Галилея рассматривалась как тело, принципиально не отличающееся от Земли. Таким образом, в последнем счете фазы Венеры доказывали физическое единство небесных тел, что и было важнейшей стороной гелиоцентризма.

Ряд светских и духовных князей Италии заинтересовались открытиями Галилея. Несмотря на начавшуюся реакцию, Галилей нашел немало сторонников. Но перипатетики были взбешены. Они решительно отказывались проверять традиционные взгляды астрономическими наблюдениями. В августе 1610 г. Галилей писал Кеплеру: «Посмеемся, Кеплер, великой глупости людей. Что сказать о главных философах здешнего университета, которые с каким-то аспидским упорством, несмотря на тысячекратные приглашения, не хотели даже взглянуть ни на планеты, ни на Луну, ни на телескоп. Поистине, как у аспида нет ушей, так у этих ученых глаза закрыты для света истины. Впрочем, это достойное внимания обстоятельство не удивляет меня. Этот род людей думает, что философия — некая книга, подобная „Энеиде“ или „Одиссее“, и истину надо искать не во Вселенной, не в природе, а в сличении текстов. Жаль, что не можем посмеяться над ними вместе. Как громко ты расхохотался бы, если бы слышал, как выступал против меня в присутствии великого герцога первый ученый университета, как пытался он логическими аргументами, как магическими заклинаниями, отозвать и удалить с неба новые планеты» [10].

По мере того как открытия Галилея делали систему Коперника достоянием широких общественных кругов, иезуиты и римская курия с растущим подозрением наблюдали, как распространяется новая идея. Над коперниканством сгущались тучи. Князья церкви уговаривали Галилея отказаться от защиты гелиоцентризма как объективной картины мира. Они толкали Галилея к традиционной формалистической трактовке системы Коперника. Кардинал Беллармино, глава инквизиции, один из самых влиятельных духовных сановников Рима, в письме к за-

[10] G. Galilei. Le Opere. Ed. Naz., v. X. Firenze, 1934, p. 423.

щитнику коперниканства патеру Фоскарини говорил: «Мне кажется, что вы и синьор Галилео поступили бы осторожно, если бы удовлетворились предположительными высказываниями и отказались от абсолютных; так поступал, как я всегда думал, и Коперник. Действительно, когда утверждают, что предположение, будто Земля движется, а Солнце неподвижно, позволяет объяснить все наблюдаемые явления лучше, чем гипотеза эпициклов и эксцентров, то такое утверждение прекрасно и не заключает в себе никакой опасности, причем этого и достаточно для математических расчетов; но когда начинают говорить, что Солнце действительно покоится в центре мира, вращается вокруг самого себя, но не движется с востока на запад, и что Земля находится на третьем небе и с большой скоростью вращается вокруг Солнца, то это вещь очень опасная и не только потому, что она раздражает всех философов и теологов, но и потому, что она вредит святой вере, поскольку из нее вытекает ложность священного писания» [11].

Однако Галилей не мог последовать советам Беллармино. Физическая реальность, объективная действительность гелиоцентризма, была основой его взглядов. В своих «Замечаниях относительно коперниканского воззрения», написанных в 1615 г., Галилей всячески подчеркивал, что нужно отвергнуть «пустые писания» Осиандера, прочитать целиком книгу Коперника и убедиться, что неподвижность Солнца и движение Земли были для Коперника объективными истинами.

Когда иезуиты начали энергичную борьбу против коперниканства, Галилей попытался открыто защищать это учение. В конце 1615 г. он поехал для этого в Рим, где ему самому пришлось защищаться от нападок инквизиции. Впрочем, они пока еще не беспокоили Галилея, и он надеялся помешать осуждению конгрегацией системы Коперника.

Но Галилей не ощущал всей глубины господствовавшей в Риме реакции. Благожелательное отношение нескольких князей церкви помешало ему увидеть действительный террор инквизиции, жертвой которого он стал семнадцать лет спустя. В Риме царили иезуиты. Попытка помешать осуждению коперниканства не могла увенчаться успехом. Противники Галилея пользовались слишком

[11] G. Galilei. Le Opere. Ed. Naz., v. XII. Firenze, 1934, p. 171.

большим влиянием, его покровители не могли выступать против них.

В марте 1616 г. конгрегация кардиналов признала систему Коперника ложной и запретила его книгу.

Решение конгрегации могло бы не повлиять на келейную работу одинокого исследователя и не помешало бы ему разрабатывать дальше взгляды Коперника. Но Галилею было необходимо общение с широкими кругами учеников и последователей. Поэтому запрещение пропаганды коперниканства было для Галилея тяжелым ударом. В доносе на Галилея Лорини называл учеников и друзей Галилея вольнодумцами, соблазненными учителем. Им угрожало преследование инквизиции. Связь учеников с Галилеем порвалась. Запрет пропаганды стал для него началом долгого одиночества,

Пятнадцать лет он мечтал снова выступить в защиту коперниканства. В 1632 г. Галилею показалось, что пришло время для этого. Надеясь на защиту и поддержку нового папы, Урбана VIII, он выпустил во Флоренции свой знаменитый «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой».

Галилей пытался отвести возможные обвинения мало кого обманувшим предисловием, где предупреждал о своем намерении изложить аргументы в пользу коперниканства лишь для доказательства, что церковный запрет исходил из детального знакомства со всеми аргументами спорящих сторон.

Содержание книги — беседа трех человек: Сагредо, Сальвиати и Симпличио в Венеции, во дворце Сагредо на Большом канале. Симпличио — защитник традиционной аристотелевской концепции. Это имя принадлежало известному комментатору Аристотеля, а по-итальянски оно означает «простак». Двое других носят имена друзей Галилея, умерших до создания «Диалога». Воззрения Галилея излагает главным образом Сальвиати. Сагредо соглашается с ним, требует разъяснений, иногда дополняет реплики Сальвиати. Симпличио спорит с Сагредо, выдвигая аргументы перипатетиков. Четыре основные идеи, последовательно доказывающие и развивающие гелиоцентрическое мировоззрение, соответствуют четырем дням беседы. Первая мысль Галилея состоит в принципиальном единстве Земли и небесных тел. Эта мысль доказывается в беседах первого дня. В беседах второго дня речь идет

о суточном вращении Земли. В продолжение третьего дня разъясняется годичное обращение Земли вокруг Солнца. На четвертый день беседа касается приливов и отливов, которые, как полагал Галилей, являются следствием суточного и годичного движения Земли.

Идея объективности гелиоцентризма, мысль о движении Земли как об истинном движении проходит через «Диалог о двух системах мира». Сначала Галилей дискредитирует картину неподвижности Земли, вводя различие между истинным и кажущимся движением и показывая, что в инерциальных системах нет никаких доказательств движения, что покой и инерционное движение эквивалентны по своему физическому эффекту. Далее он утверждает, что при всяком движении тела неподвижность необходимо приписывать центрам вращения. Наконец, излагая теорию приливов, Галилей доказывает абсолютный характер движения Земли.

В беседах второго дня Галилей устами Сальвиати и Сагредо утверждает, что движение не может быть обнаружено на самом движущемся теле, так как все части тела участвуют в общем движении. Сальвиати перечисляет аргументы перипатетиков: камень, брошенный с башни, отошел бы далеко на запад от ее подножия, если бы башня, увлекаемая Землей, за это время двигалась бы на восток, подобно тому, как свинцовая пуля, брошенная с мачты, отстанет от движения корабля и упадет сзади мачты, ближе к корме. Соответственно ядро из вертикально поставленной пушки упадет не возле нее, а немного далее к западу. Ядро, выпущенное пушкой на запад, пролетит дальше, чем если бы оно было пущено на восток, потому что Земля успеет несколько продвинуться навстречу ядру за время его полета. При выстрелах на север и на юг цель смещалась бы благодаря движению Земли, и снаряды не попадали бы в нее. В действительности перечисленные явления не наблюдаются, и, таким образом, Земля неподвижна.

Затем Сальвиати перечисляет и другие доводы. Облака и птицы в воздухе не могли бы поспеть за Землей и неслись бы на запад вдоль ее поверхности. Мы ощущали бы сильный ветер с востока, если бы Земля двигалась на восток, так как воздух оказывал бы сопротивление нашим телам, уносимым Землей. Перечислив все эти аргументы, Сальвиати опровергает их. Он начинает с аналогии между

падением камня с башни и груза с мачты движущегося корабля. Неожиданно Сальвиати спрашивает Симпличио, подтверждено ли опытом отставание груза, брошенного с мачты на палубу? Симпличио вынужден признать, что он не знает подобных опытов, хотя именно они могли бы в данном случае решить вопрос. Но Сальвиати предлагает решить вопрос теоретически. Он рассказывает Симпличио о инерции, пользуясь следующим построением. Совершенно круглый шар на совершенно гладкой доске будет катиться с ускорением вниз по наклонной плоскости, а если ему дадут толчок в противоположном направлении, то его движение замедлится.

После этого Сальвиати спрашивает у Симпличио, что произойдет с шаром, если шар будет катиться по плоскости, не поднимаясь и не опускаясь при этом? «Позвольте немного подумать,— отвечает Симпличио,— если нет никакого склона, то нет и естественного стремления к движению, а если нет подъема, то нет противодействия движению. Значит, тело безразлично должно быть и к тому, чтобы приходить в движение, и к тому, чтобы противиться движению. Оно должно, кажется мне, по природе остаться в покое». «А если дать шару толчок?» — продолжает спрашивать Сальвиати. Симпличио отвечает, что так как нет основания ни к замедлению, ни к ускорению, то шар будет продолжать свое движение, пока не встретит какое-либо препятствие. Дальше Сальвиати показывает, что тело, беспрепятственно движущееся по поверхности Земли, не будет иметь импульса для того, чтобы ускорить свое движение или замедлить его, так как ускорить движение оно может, лишь скатываясь вниз, приближаясь к центру Земли, а замедлить,— поднимаясь вверх, отдаляясь от центра Земли.

Установив понятие инерции, Сальвиати доказывает, что тело, брошенное с вершины мачты, будет продолжать свое движение вперед и упадет на палубу, не отстав от корабля при падении. Соответственно тяжесть, сброшенная с башни, пушечные ядра, летящие птицы, облака и воздух в силу инерции принимают участие в движении Земли, и на них нельзя ссылаться, доказывая или отрицая вращение Земли.

В заключение Сальвиати предлагает Симпличио наблюдать в каюте корабля полет насекомых, движение рыбок в аквариуме и ряд других физических процессов. При

равномерном движении корабля все эти процессы нисколько не изменяются.

«Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения, рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях, все падающие капли попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же, и если бы будете прыгать сразу двумя ногами, то сделаете прыжок на одинаковое расстояние, в любом направлении» [12].

Галилей требует, чтобы его оппоненты внимательно регистрировали эквивалентность всех направлений в горизонтальной плоскости, хотя у них и не может появиться сомнения в такой эквивалентности, *пока корабль стоит на месте*. Затем корабль заставляют двигаться прямолинейно и равномерно, т. е. без ускорения, вдоль курса, без поворотов и без килевой и бортовой качки. Ход описанных процессов не меняется. «Прыгая, вы переместитесь по полу на то же расстояние, что и раньше, и не будете делать бóльших прыжков в сторону кормы, чем в сторону носа, на том основании, что корабль быстро движется, хотя за то время, как бы будете в воздухе, пол под вами будет двигаться в сторону, противоположную вашему прыжку, и, бросая какую-нибудь вещь товарищу, вы не должны будете бросать ее с большей силой, когда он будет находиться на носу, а вы на корме, чем когда ваше взаимное положение будет обратным; капли, как и ранее, будут падать в нижний сосуд, и ни одна не упадет ближе к корме, хотя, пока капля находится в воздухе, корабль пройдет много пядей; рыбы в воде не с бóльшим усилием будут плыть к передней, чем к задней части сосуда, настолько же проворно они бросятся к пище, положенной в какой угодно части сосуда, наконец, бабочки и мухи попрежнему будут летать во всех направлениях, и никогда не случится того, чтобы они собрались у стенки, обращенной к корме, как если бы устали, следуя за быстрым движением корабля, от которого они были совершенно обособлены, держась долгое время в воздухе, и если от капли

[12] Г. Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира. Избр. труды, т. I, стр. 286.

зажженного ладана образуется немного дыма, то видно будет, как он восходит вверх и держится наподобие облачка, двигаясь безразлично, в одну сторону не более, чем в другую» [13].

Следует обратить внимание на своеобразный эмоциональный подтекст приведенной реплики Сальвиати. Трудно отдать себе отчет, что именно создает здесь ощущение непринужденной и светлой радости. В последнем счете дело объясняется пронизывающей творчество Галилея (выраженной кое-где явно, а кое-где подбором удивительно ясных, «светлых» аргументов) торжествующей и радостной апологией разума, раскрывающего самым непреложным образом тайны бытия. Они раскрываются в математических соотношениях, и тут невольно вспоминаются сказанные через много лет слова Лейбница о музыке: «...это радость души, которая вычисляет, сама не зная того». У Галилея нарисована качественная картина явлений в каюте, но именно она содержит в себе зародыш картины мира, объясняющей действительность математически, т. е. «с такой абсолютной достоверностью, какую имеет сама природа» [14]. Приведенная реплика имеет маргиналию:

«Опыт, показывающий несостоятельность всех опытов, приводимых против движения Земли».

Мысленный опыт Галилея — родоначальник трехвековой серии мысленных опытов, демонстрирующих механическую природу явлений природы, возможность объяснить ее явления наглядной кинематической схемой движущихся тел, движущихся в однородном пространстве. Эта возможность (и вместе с ней возможность исчерпывающего математического анализа природы) и лежит в основе той торжествующей ясности, которой пронизана картина, нарисованная Галилеем. Но картина эта — качественная, многокрасочная, и здесь звучит пафос *возможности* математического познания природы, а не самого познания. Именно поэтому конкретные и однозначные выводы ограничиваются движением Земли. Впоследствии понятие инерции стало исходным пунктом обоснования идеи, *бесконечной* Вселенной. Если движение предоставленного самому себе тела продолжается с неизменной скоростью,

---

[13] Избр. труды, т. I, стр. 286—287.
[14] Там же, стр. 201.

то мы переходим из царства конечных и наглядно представимых кинематических схем в бесконечную Вселенную, где математические соотношения выступают в своем абстрактно-логическом виде без каких-либо чувственных образов. Таков мир Ньютона и Лагранжа. Галилей останавливается у порога этого мира. Как мы увидим вскоре, он останавливается в раздумье.

Понятие инерции приводит однозначным образом к бесконечной траектории предоставленного себе тела, если под движением по инерции понимают движение по прямой, т. е. сохранение не только абсолютной скорости на траектории, но и сохранение направления траектории. Иначе она может замкнуться, и инерционное движение не выведет тела за пределы ограниченной области пространства.

Но у Галилея движение по инерции именно таково, оно происходит не по прямой, а по замкнутой кривой — по окружности. *Реальная* горизонтальная плоскость, говорит Галилей,— это сферическая поверхность. Почему, двигаясь по сферической поверхности, тела сохраняют свою скорость? Каковы аргументы Галилея, обосновывающие круговой характер траекторий тел, предоставленных самим себе?

Отметим прежде всего, что у Галилея в ранних механических трактатах не было абстрактного понятия тела, предоставленного самому себе при полном устранении других, действующих на него тел. Галилей склонен к таким мысленным экспериментам, в которых конкретная кинематическая модель гасит воздействие других тел на данное. Тяжелое тело катится по гладкой поверхности сферы, центр которой совпадает с центром Земли. Оно не поднимется, не удалится от поверхности сферы, поскольку такое движение не свойственно тяжелому телу. Оно не приблизится к Земле, так как этому препятствует сфера. Что же касается самой сферической поверхности, то к движению по ней тело безразлично [15].

Конкретный характер такой модели скрывает связь движения по круговой орбите с собственно геометрическими свойствами этой орбиты. Тело катится по орбите потому, что его движение к ее центру нейтрализовано сопро-

---

[15] См. G. Galilei. Le Opere. Ed. Naz., v. I. Firenze, 1929, p. 300.

тивлением твердой сферической поверхности. Но это — характерная для Галилея конкретная форма весьма абстрактного представления.

По существу нейтрализация свойственного телу движения к центру и означает, что тело предоставлено самому себе — ведь воздействие поверхности сферы в свою очередь гасится стремлением тела к центру.

Подобная схема легко переходит в более абстрактную форму — в концепцию тела, предоставленного самому себе, причем неизбежно возникает вопрос о геометрических свойствах орбиты. В «Диалоге» Галилей отказывается от твердых сфер и устраняет как воздействие твердой поверхности сферы, так и тяготение планеты к Солнцу, т. е. обе силы, которые в предыдущей схеме нейтрализовали одна другую.

Основное понятие небесной механики «Диалога» — круговое равномерное движение [16]. В отличие от Кеплера, Галилей рисует чрезвычайно простую картину солнечной системы. В общем центре планетных круговых орбит находится Солнце. Планеты равномерно движутся каждая по своей окружности. Вся теория неравномерности в движении планет, вплоть до законов Кеплера, Галилеем не принимается во внимание. Кеплер уже в 1609 г. писал об эллиптической орбите Марса и о различной скорости планеты в разных точках эллипса, но Галилея эта сторона дела не интересует.

Для любого механика после ньютоновского периода ясно, что движение, которое Земля сообщает находящимся на ней предметам при своем суточном вращении, по инерции будет направлено вдоль касательной к земной поверхности. Но для Галилея направление инерционного движения совпадает с направлением движения находящихся на земле предметов. Основа представления об инерционном движении как о круговом состоит в том, что Галилей не рассматривает тяготения.

Действительное объяснение движения небесных тел при помощи земной механики могло быть получено лишь после того, как Декарт четко сформулировал идею прямолинейности инерционного движения, а Ньютон, дополнив

---

[16] См. A. Koyré. Etudes galiléennes, I. Paris, 1939, p. 72; III. Paris, 1939, p. 48; Н. И. Идельсон. Галилей в истории астрономии. Сб. «Галилео Галилей». М., 1943, стр. 127.

принцип инерции законом тяготения, построил механику, объединившую законы криволинейного движения Кеплера с принципами механики Галилея.

Идея кругового инерционного движения, т. е. мысль о том, что тело, предоставленное самому себе, будет равномерно двигаться по окружности, позволяет увидеть и связь механики Галилея с механикой и космологией Аристотеля, и глубокое отличие идей Галилея от всей предшествующей науки.

В основе мировоззрения Галилея лежала идея, которая была и остается стержневой идеей науки: вся совокупность процессов во Вселенной образует некоторое гармоничное, упорядоченное целое, все в мире пронизано объективным ratio. Эта идея так же стара, как сама наука, она появилась вместе с наукой, она отличает науку от донаучных представлений, и развитие науки состоит в последовательном выяснении каузальной связи, объединяющей мироздание и превращающей его в упорядоченное целое.

В начале первого дня беседы между Симпличио, Сагредо и Сальвиати последний говорит о взглядах Аристотеля и присоединяется к мысли о господствующем в мире порядке. Реплики, вложенные Галилеем в уста Сальвиати, позволяют думать, что ученый XVII столетия ближе, хотя бы по видимости, к IV в. до н. э., чем к концу своего столетия. В конце и даже в середине XVII в. полагали, что каузальная гармония бытия выражается во взаимодействии тел, искривляющем прямолинейные движения, свойственные изолированным телам. В IV в. до н. э. Аристотель представлял себе гармонию мира в виде *статической конфигурации естественных мест,* в которых оказываются тела, когда Вселенная переходит в упорядоченное состояние. Тела движутся прямолинейно к своим естественным местам (тяжелые тела — к центру Земли, т. е. центру Вселенной). Но это судьба несовершенных тел подлунного мира. Совершенные тела движутся не из чего-то во что-то, а повторяют неизменные круги на концентрических небесных сферах — им свойственны круговые движения.

Галилей, как и Коперник, не отказывается от понятия совершенных круговых движений, но вводит Землю в число тел, испытывающих подобные движения. Как мы увидим, такая модификация понятия совершенных движений должна была в конце концов привести к более ради-

кальному пересмотру аристотелевой концепции пространства — к ньютоновому понятию однородного бесконечного «плоского» пространства. Но это было сделано после Галилея.

В «Диалоге» круговое движение вытекает из существования «совершеннейшего порядка», гармонии мироздания. «Прямолинейное движение не может существовать в хорошо упорядоченном мире» — гласит маргиналия к словам Сальвиати, в которых он солидаризуется с концепцией Аристотеля. Следует подчеркнуть, что одним из аргументов, исключающих прямолинейное движение из числа совершенных, служит бесконечность прямой линии: прямая траектория не приводит к какому-либо окончательному результату движения, она может быть продолжена как угодно далеко и не определяется конечной статической схемой неподвижных естественных мест.

Галилей склоняется даже к некоторому намеку на космогоническую схему: первоначальное неупорядоченное состояние Вселенной включало прямолинейные движения, но потом, когда Вселенная достигла гармонии, сохранились лишь круговые движения [17].

Идея, которая сближает Галилея с Аристотелем, принадлежит к числу «вопросов», противостоящих «ответам» — положительному и канонизированному содержанию перипатетической механики и космологии. Движения вверх и вниз и «вынужденные» движения физики Аристотеля были позитивными и каноническими элементами перипатетизма. Напротив, движения сфер, т. е. смещения в двумерных пространствах, концентрически окружающих центр мироздания, оставались областью апорий, противоречий, колебаний и в целом — областью вопросов, адресованных будущему. Здесь таились понятия однородности и непрерывности пространства и относительности движения [18].

Именно к этим направленным в будущее идеям Аристотеля и обращается Галилей. После упомянутых замечаний об упорядоченности мира и круговых движений беседа уходит в сторону и касается проблем скорости и

---

[17] См. Избр. труды, т. I, стр. 116.

[18] См. Б. Г. Кузнецов. Бесконечность и относительность. Сб. «Эйнштейн и развитие физико-математической мысли». М., 1962, стр. 137—154.

ускорения. Затем она возвращается к проблеме круговых и прямолинейных движений.

«Итак,— говорит Сальвиати,— вернемся к нашему первому положению и начнем вновь с того места, где мы уклонились в сторону, когда, если я не ошибаюсь, мы установили, что прямолинейное движение не может иметь места в упорядоченной Вселенной, затем мы говорили, что не так дело обстоит с движениями круговыми, из коих то, которое совершается движущимся телом самим по себе, всегда удерживает его в одном и том же месте, а то, которое состоит в движении тела по окружности круга около своего постоянного и неподвижного центра, не допускает беспорядка ни по отношению к себе, ни по отношению к окружающим телам. Ведь такое движение прежде всего есть движение законченное и определенное и не только законченное и определенное, но нет ни одной точки на окружности, которая не была бы первым и вместе с тем конечным пунктом кругового движения...» [19].

Из того, что на круговой орбите *каждая* точка служит и начальным и конечным пунктом движения, Галилей выводит равномерность кругового движения. Ускорение — результат влечения к некоторому месту пространства. На круговой орбите таких мест нет, и круговое движение не может быть ускоренным.

«Так как это движение есть такое, благодаря которому движущееся тело всегда отправляется от данного пункта и всегда приходит к нему же, то прежде всего только одно оно может быть движением равномерным, ибо ускорение движения получается у движущегося тела тогда, когда оно направляется к тому месту, к которому у него есть влечение, а замедление наступает при нерасположении к движению, которое удаляет его от этого места. А так как в круговом движении движущееся тело всегда отправляется от естественного конца и направляется всегда к нему же, то влечение и нерасположение всегда имеют в нем равную силу, из такого равенства проистекает не ускорение и не замедление, но равномерность движения» [20].

Перипатетические «влечения» и «нерасположения» несомненно свидетельствуют о близости Галилея к аристотелевой традиции. Но к *какой* традиции? В данном случае

---

[19] «Диалог». Избр. труды, т. I, стр. 128.
[20] Там же, стр. 129.

схема Галилея примыкает к той живой, неканонизированной (и неспособной к канонизации) стихии вопросов и поисков, которые античная наука оставила последующим векам как антидогматическую традицию. На круговой орбите «влечения» и «нерасположения» нейтрализуют друг друга. Что это значит, каков смысл этой перипатетической по форме схемы? Если «влечения» и «нерасположения» нейтрализуются и погашаются, мы получаем пространство, в котором нет выделенных точек, определяющих своей конфигурацией движение тел. Такими *однородными пространствами* без выделенных точек были уже концентрические сферические поверхности в космологии Аристотеля. Но Галилей связывает «влечения» и «нерасположения» с *ускорениями*; движение с постоянной скоростью не требует импульса, это сразу меняет картину мира.

Как только движение становится состоянием и приписывается телам, представленным самим себе, упорядоченность мира, его гармония, его ratio теряют статический характер и приобретают характер *кинематической* схемы. У Аристотеля движениям, требующим импульса, противостояла система естественных мест и «совершенных» движений, из которых первые — естественные места — были определяющим элементом мировой гармонии. У Галилея определяющей становится схема равномерных *движений*, именно круговых движений, которые он считает естественными. Статическая схема уходит на задний план, причем так далеко, что ее наличие или присутствие в картине мира становится почти незаметным и даже перестает интересовать Галилея. В этом, как мы увидим, ключ к пониманию стиля и содержания космологических экскурсов Галилея.

У Галилея идея мировой гармонии приобретает по сравнению с Аристотелем принципиально иную форму. Пребывающее, неизменное, то, что является субъектом изменений (тождественным себе субъектом, без которого теряет смысл понятие изменения),— это уже не естественная статическая конфигурация, а естественная кинематическая схема равномерных движений. Соответственно изменения отныне выражаются в изменениях скорости.

Какие же равномерные неизменные по абсолютной скорости движения являются элементами мировой гармонии — криволинейные или прямолинейные?

Если первые (если все тела, предоставленные самим себе, движутся криволинейно, по замкнутым кривым орбитам), то схема движений предоставленных себе тел *сама* обеспечивает постоянство космических процессов. Если же тела сами по себе движутся прямолинейно, то упорядоченная система мира включает определенные взаимодействия тел, искривляющие их пути,— вихри Декарта или ньютоновы центростремительные силы всемирного тяготения.

Забегая вперед, заметим, что в XIX столетии понятие царствующего в природе «порядка» получило рациональную форму законов *сохранения* различных физических переменных, причем выяснились важные логические связи этого понятия. Сохранение импульса выражает как бы «невмешательство» пространства в ход физических процессов, возможность для системы перейти из одной точки пространства в другую без изменения характера происходящих в системе внутренних процессов, эквивалентность точек пространства (в смысле тождества некоторых соотношений, описывающих ход процессов в системе), иными словами, *однородность пространства.* С точки зрения общей теории относительности эквивалентные точки (для которых переход системы из одной в другую не вызывает изменения хода физических процессов) не обязательно образуют прямые линии, в общем случае они образуют кривые. Пространство общей теории относительности, как мы увидим позже,— однородное искривленное пространство.

В приведенных строках «Диалога» круговая траектория характеризуется тем, что на ней нет неэквивалентных точек. Ни в одной точке движение не начинается и не заканчивается, ни одна точка не выделяется из других тем, что в ней тело ведет себя по-иному: начинает стремиться к другой точке или попадает в свое естественное место и останавливается. Таким образом, речь идет о некотором пространстве, составленном из эквивалентных точек, т. е. об *однородном* в этом смысле пространстве.

Разумеется, такая интерпретация круговой, криволинейной космической инерции Галилея возможна только как ретроспективная интерпретация. До 1916 г., до появления общей теории относительности, никто не мог бы присвоить атрибут однородности тем сферическим поверхностям, которые окружают Солнце и по которым планеты движутся, согласно Галилею, без какого-либо воздействия

тяготения и вообще сил взаимодействия космических тел. Каждое сопоставление физической концепции прошлого с современной рискует вызвать обвинение в модернизации. В данном случае подобное обвинение, по-видимому, не имело бы основания и, более того, смысла по следующим причинам.

Можно произвольным образом отождествить позитивную концепцию прошлого с позднейшей, вопреки действительному, независимому от сопоставлений и сравнений физическому смыслу старой концепции. Но можно ли провести аналогичную операцию *с вопросами и апориями*, не получившими в свое время ответа и разрешения? Ведь эти вопросы и апории не имеют независимого от сопоставлений абсолютного смысла, их смысл неясен, пока не дан тот или иной ответ, пока не предпринята та или иная попытка разрешения апории. Смысл загадки раскрывается, когда загадка разгадана, хотя бы отчасти. Некоторая аналогия пояснит подобное соотношение. Расстояния между точками не меняются при переходе от одной системы отсчета к другой. Расстояния между точками — инварианты координатных преобразований. Напротив, координаты точек не имеют определенного смысла без указания системы отсчета. Содержание позитивных концепций («что было найдено») может быть выражено инвариантным образом, независимо от той или иной исторической «системы отсчета», т. е. от той или иной исходной позиции исторической ретроспекции. Смысл апории или вопроса («что не было найдено») не может быть сформулирован инвариантным образом.

Когда мы подходим к галилеевой криволинейной космической инерции с позиций общей теории относительности, мы не ищем в «Диалоге» «предвосхищения» идей Эйнштейна. Мы не ищем даже каких-либо позитивных исторических прообразов этих идей. Галилей, отрицая тяготение и приписывая криволинейную траекторию телу, предоставленному самому себе, не приходил и не мог прийти к мысли о тождестве тяготения и искривления пространства. Дело тут в другом. После того как Эйнштейн установил физическую реальность однородного искривленного пространства, изменилась существовавшая раньше (хотя и неясно) определенная исходная позиция ретроспективной оценки криволинейной инерции Галилея. Ее оценивали в свете первого закона Ньютона как

ошибочную, противоречащую очевидному, как казалось тогда, принципу прямолинейного инерционного движения и закону тяготения. Теперь мы склоняемся к иному взгляду и видим в идее круговых движений Земли и других планет некоторую зачаточную и недифференцированную форму всех позднейших модификаций принципа инерции и идеи однородности пространства, включающей и концепцию криволинейного однородного пространства.

Для характеристики науки XVII в. весьма существенно представление о системе Галилея, как о чем-то живом, неустановившемся, включающем предварительные варианты не только классической механики Ньютона, но и позднейших обобщений. XVII столетие было расцветом гибких, переходящих одна в другую, не отлившихся в твердые формы тенденций научной мысли.

Сказанное позволяет разобраться в отношении Галилея к идее Солнца как центра мира.

В «Диалоге» и в других работах Галилея мы не раз встречаемся с утверждением о конечной Вселенной с центром, в котором находится Солнце. Сразу же после приведенных рассуждений о космической гармонии круговых равномерных движений Сальвиати, продолжая критику геоцентризма, говорит: «...если можно приписывать Вселенной какой-нибудь центр, то мы найдем, что в нем помещается скорее Солнце, как вы убедитесь из дальнейшего хода рассуждения» [21].

Понятию центра Вселенной соответствует понятие некоторой объемлющей Вселенную сферы. Галилей понимает это, но понятие центра — Солнца — интересует его гораздо больше, чем явно непредставимые, хотя логически и связанные с понятием центра, границы Вселенной. В беседе третьего дня Сальвиати заставляет Симпличио нарисовать схему Вселенной, которая соответствует неоспоримым астрономическим данным. Схема — чисто коперниканская. В заключение Сальвиати спрашивает: «Что же мы теперь сделаем с неподвижными звездами?». Симпличио помещает их в сфере, ограниченной двумя сферическими поверхностями с центром — Солнцем. «Между ними я поместил бы все бесчисленное множество звезд, но все же на разной высоте, это могло бы называться сферой Вселен-

[21] «Диалог». Избр. труды, т. I, стр. 130—131.

ной, заключающей внутри себя орбиты планет, уже обозначенные нами» [22].

У Галилея можно встретить представление о конечной Вселенной как о звездном острове в бесконечном пространстве. Парируя аргументы против Коперника — ссылки на слишком большие масштабы звездной сферы, вытекающие из гелиоцентрической системы, Сальвиати говорит:

«Теперь, если бы вся звездная сфера была одним сияющим телом, то кто не поймет, что в бесконечном пространстве можно найти такое большое расстояние, с которого вся светящаяся сфера покажется совсем маленькой, даже меньше того, чем нам кажется сейчас с Земли неподвижная звезда?» [23]

Отметим следующее, весьма важное и характерное обстоятельство. Когда Галилей говорит о конечной Вселенной, он всегда говорит об этом очень неуверенно. Так же он говорит о бесконечной, лишенной центра Вселенной. Иногда встречаются заявления о неразрешимости проблемы конечности либо бесконечности мироздания. В беседе третьего дня Сальвиати задает Симпличио вопрос: что последний понимает под центром, вокруг которого вращается Земля? «Под центром я понимаю центр Вселенной, центр мира, центр звездной сферы, центр неба» [24],— отвечает Симпличио.

Сальвиати сомневается в существовании такого центра, он придает вопросу условный характер: что находится в центре Вселенной, если таковой существует?

«Хотя я и мог бы на вполне разумных основаниях поднять спор о том, существует ли в природе такой центр, так как ни вы, ни кто-либо другой не доказали, что мир конечен и имеет определенную форму, а не бесконечен и неограничен, я уступаю вам пока, допуская, что он конечен и ограничен сферической поверхностью, а потому должен иметь свой центр, но все же следует посмотреть, насколько вероятно, что Земля, а не другое тело, находится в этом центре» [25].

По мнению Галилея, Аристотель не мог бы отказаться от идеи конечной Вселенной с центром, и, если бы наблю-

---

[22] «Диалог». Избр. труды, т. I, стр. 421.
[23] Там же, стр. 464.
[24] Там же, стр. 415.
[25] Там же.

дения заставили его отказаться от геоцентрической схемы, философ поместил бы в центре мира Солнце. Доказательство исходит из приводимых здесь перипатетических схем — исходных пунктов аристотелевой космологии. Соответственно выбор центрального тела должен вытекать из кинематических соображений. Подобные соображения заставляют поместить Солнце в центре планетных орбит. Этот же центр должен считаться, при допущении конечного сферического мира, центром последнего.

«Итак, начнем опять наше рассуждение сначала и примем ради Аристотеля, что мир (о величине которого, кроме неподвижных звезд, у нас нет никаких доступных чувству показаний) есть нечто такое, что имеет сферическую форму и движется кругообразно и по необходимости имеет — принимая во внимание форму и движение — центр, а так как, кроме того, мы достоверно знаем, что внутри звездной сферы существует много орбит, одна внутри другой, с соответствующими звездами, которые также движутся кругообразно, то спрашивается, чему более разумно верить и что более разумно утверждать, то ли, что эти внутренние орбиты движутся вокруг одного и того же мирового центра, или же что они движутся вокруг другого, очень далекого от первого?» [26]

Симпличио отвечает, что правдоподобнее существование одного и того же общего центра. Тогда Сальвиати говорит: «Значит, если правильно, что центром мира является точка, вокруг которой движутся орбиты небесных тел, т. е. планет, то гораздо более правдоподобно, что не Земля, а Солнце находится в центре мира» [27].

Далее беседа возвращается к доказательствам обращения планет вокруг Земли.

Переход от солнечной системы к космосу сопровождается у Галилея оговорками об условности понятия центра и границ Вселенной не только в «Диалоге». Это постоянный скептический рефрен высказываний о Вселенной в целом. В «Послании к Инголи» Галилей говорит: «И разве вам неизвестно, что до сих пор еще не решено, и я думаю, что человеческая наука никогда не решит, конечна ли Вселенная или бесконечна?» [28].

---

[26] «Диалог». Избр. труды, т. I, стр. 417.
[27] Там же.
[28] Там же, стр. 68.

Характерно, что тон Галилея меняется каждый раз, когда он переходит от солнечной системы к космосу. Исчезает обычная энергия стиля, щедрость эпитетов и образов, в изложении начинает сквозить какая-то вялая индифферентность. Вряд ли это может быть объяснено сугубой опасностью идеи бесконечности мира, тесно связанной с именем Джордано Бруно. Столь же опасная идея физической реальности и однозначности системы Коперника излагается довольно энергично. Во всяком случае, одиум вокруг имени Бруно не объясняет, почему именно в этой теме, не более опасной, чем некоторые другие, Галилей отказался от решительных заявлений.

По-видимому, основная причина состоит в самом содержании основных физических и астрономических воззрений и в стиле творчества Галилея.

Выше уже говорилось, что бесконечное пространство — это область, где можно двигаться не с качественно-модельными предпосылками математического исследования природы, а только с самими математическими понятиями и методами. Галилей в слишком большой мере принадлежал эпохе Ренессанса, чтобы отойти от наглядных кинетических схем, уже не статических схем, как у Аристотеля, но еще не аналитических конструкций, от области мысленного эксперимента и наглядных аналогий. Основное содержание его идей находило здесь адекватное выражение и становилось достоянием очень широкого круга людей предметной и конкретной мысли. Экстенсивная бесконечность бытия не меняла ничего в трактовке тех проблем, которые были центральными для самого Галилея, для его сторонников и в целом для всей науки первой половины XVII в. Вокруг Солнца обращаются планеты, далее расположены неподвижные звезды на таких расстояниях, которые превышают все, что можно себе представить. Что может к этому прибавить возведение масштабов Вселенной в ранг бесконечных? То, что сближает Галилея с культурой Ренессанса в собственном смысле, противоречит его углублению в область, где исчезает как бесконечно малое не только Земля, но и все, что открылось взору Галилея в 1610 г., когда он впервые направил телескоп на звездное небо.

Основное, что отличает Галилея от Аристотеля, это *дифференциальное мировоззрение,* представление о бесконечном числе бесконечно малых элементов простран-

ства и времени, в которых осуществляются наиболее точным образом закономерности бытия. Представление о мгновенном ускорении — пределе отношения приращения скорости к приращению времени, при стягивании последнего в мгновение, о мгновенной скорости — отношении пройденного пути ко времени, когда первый стягивается в точку и второе — в мгновение, это представление было строго сформулировано после Галилея, но у последнего были для этого все необходимые понятия, и мы с ними вскоре встретимся, познакомившись с «Беседами и математическими доказательствами». Старая аристотелевская схема, где движения определялись граничными условиями: «из чего-то во что-то», сменилась в «Диалоге» и позже в «Беседах» схемой, где движение определяется соотношением бесконечно малых приращений пространства и времени. Эти локальные соотношения были связаны с понятием бесконечности пространства и времени, но *интенсивной бесконечности*. В 1866 г. Риман говорил: «Для объяснения природы вопросы о бесконечно большом — вопросы праздные. Иначе обстоит дело с вопросами о неизмеримо малом. От той точности, с которой нам удается проследить явления в бесконечно малом, существенно зависит наше знание причинных связей. Успехи в познании механизма внешнего мира, достигнутые на протяжении последних столетий, обусловлены почти исключительно благодаря точности того построения, которое стало возможно в результате открытия анализа бесконечно малых и применения основных простых понятий, которые были введены Архимедом, Галилеем и Ньютоном и которыми пользуется современная физика» [29].

Риман с удивительной исторической точностью называет три имени, которые показывают исторические истоки дифференциального мировоззрения. Галилей связывает античные прообразы этого мировоззрения с его сравнительно завершенной формой. В этом главная историческая заслуга Галилея. После него на три с лишним века основой физики стало представление о движении тождественного себе объекта от точки к точке и от мгновения к мгновению — об интенсивной бесконечности точек и мгновений. В бесконечно малых областях мы встречаемся с про-

[29] См. «Об основаниях геометрии». Сб. классических работ. М., 1956, стр. 323.

стыми соотношениями между пространством и временем, которые приводят к весьма точному описанию причинных связей.

Вплоть до развития общей теории относительности проблема экстенсивной бесконечности Вселенной соответствовала замечанию Римана. Именно поэтому чем дальше наука уходила от мира конечных областей, которые она делила на бесконечное число бесконечно малых частей, к экстенсивной бесконечности, к бесконечно большому, тем с большим правом она пользовалась неоднозначными конструкциями. Но пафос творчества Галилея — это пафос однозначности. Астрономические взгляды Галилея теряли свою определенность по мере удаления от единственного центра мироздания, который он допускал — от Солнца. Схема *конечных* сферических поверхностей, равноотстоящих от центра Солнца,— первое звено концепции Галилея.

Далее контуры схемы расплываются. Сфера неподвижных звезд описывается в условной форме, а пространству и Вселенной в целом Галилей не только не решается (да и по существу не стремится) приписать бесконечные либо конечные размеры, но даже сомневается в возможности решения этой проблемы. Но крайняя неопределенность схемы того, что теперь называют Вселенной в целом, и некоторая неопределенность звездной астрономии Галилея не уменьшает удивительной яркости и точности схемы в той области, бесспорным центром которой служит Солнце. Эта схема круговых движений, противоречащая и законам Кеплера, и прямолинейной инерции Декарта, и ньютоновой схеме, оказывается при современной ретроспекции комплексом апорий и проблем, адресованных нашему столетию и нашедших свое решение в общей теории относительности. В той смелости, отчетливости и вместе с тем удивительной наглядности, которой отличается эта схема, воплотились характерные черты культуры Ренессанса.

Вернемся к доказательствам пребывания Солнца в центре планетных орбит. Основное доказательство состоит в астрономических наблюдениях, согласно которым планеты находятся то ближе, то дальше от Земли. Марс, Юпитер и Сатурн приближаются к Земле в наибольшей степени в те моменты, когда они противостоят Солнцу. Наоборот, когда эти планеты приближаются к Солнцу, они особенно далеки от Земли. В те моменты, когда Марс на-

ходится по другую сторону от Земли, чем Солнце, он гораздо ближе к ней, чем в другое время, когда находится в той же стороне от Земли, что и Солнце.

Симпличио просит пояснить структуру мира чертежом. Здесь изложение Галилея достигает апогея ясности, убедительности и остроумия. Сальвиати заставляет Симпличио составить коперниканскую схему суточной системы. «Пусть этот белый лист,— обращается он к Симпличио,— будет огромным пространством Вселенной, на котором вы должны расположить и привести в порядок части Вселенной так, как это вам продиктует разум».

Симпличио, разумеется, согласен, что Земля не совпадает с Солнцем, и поэтому по предложению Сальвиати он рисует на чертеже Землю и Солнце в двух произвольных точках чертежа. Дальше идет классическое сократовское доказательство. Где на чертеже поместить Венеру? Она никогда не удаляется от Солнца больше, чем на определенный отрезок дуги небосвода, она никогда не противостоит Солнцу, она кажется наибольшей, приближаясь к Солнцу вечером, и меньшей, приближаясь к нему утром. Отсюда Симпличио вынужден заключить, что Венера находится на той же стороне от Земли, что и Солнце, причем, приближаясь к Земле, оказывается между Землей и Солнцем, а в момент максимального удаления от Земли — за Солнцем. Симпличио приходится начертить орбиту Венеры вокруг Солнца так, чтобы эта орбита не захватила Землю. Далее Сальвиати заставляет его нарисовать орбиту Меркурия. Меркурий удаляется от Солнца еще меньше, чем Венера; поэтому Симпличио рисует на чертеже меньший круг, внутри круга Венеры. Куда поместить Марс? Противостояние Марса и отсутствие фаз заставляют Симпличио признать, что Марс включает внутрь своей орбиты и Солнце и Землю.

Аналогичным образом Симпличио рисует орбиты Юпитера и Сатурна. Для Луны он также находит место в солнечной системе.

Наконец, неподвижные звезды он помещает в область, которая охватывает обозначенные ранее орбиты планет. «Итак, синьор Симпличио,— говорит Сальвиати,— к настоящему моменту мы уже расположили мировые тела в точном соответствии с системой Коперника».

Однако в действительности все перечисленные доводы говорят лишь о возможности гелиоцентрической системы.

В чем же решающее преимущество этой системы перед геоцентризмом?

В «Диалоге» мы встречаем строки, снабженные заметкой на полях: «В высокой степени важный аргумент в пользу Коперника это — устранение стояния и попятного движения планет» [30]. Сагредо спрашивает, как Коперник объясняет маловероятные остановки, прямые и попятные продвижения планет. Сальвиати говорит, что гелиоцентрическая концепция переносит все эти нарушения равномерности в область видимых движений, так что мир истинных движений не знает ускорений. «Вы увидите такое их объяснение, синьор Сагредо,— говорит Сальвиати об остановках и переменах направлений планет,— что его одного должно быть достаточно для всякого не слишком дерзкого упрямца, чтобы заставить его выразить одобрение и всему остальному в этом учении. Итак, я говорю вам, что ничто не изменится в 30-летнем движении Сатурна, 12-летнем — Юпитера, 2-летнем — Марса, 9-месячном — Венеры и примерно 80-дневном движении Меркурия: видимые неравенства в движении всех 5 перечисленных звезд порождают одно лишь годовое движение Земли между Марсом и Венерой» [31].

Таким образом, Галилей противопоставлял непосредственно чувственному восприятию картины движения небесных тел рациональную схему истинных движений. Они должны объяснить видимые движения наиболее простым образом.

Наряду с уже упомянутыми доказательствами коперниканской системы в «Диалоге» содержится и попытка прямого доказательства движения Земли. Речь идет о теории приливов. Галилей придавал этой теории настолько большое значение, что хотел назвать всю книгу трактатом о приливах. Но католическая цензура заставила Галилея изменить заглавие книги. В Ватикане полагали, что не может быть объективных физических доказательств истинности коперниканства. Это соответствовало традиции, которая шла от Осиандера. После своего избрания папа Урбан VIII заявил, что «никогда не удастся привести принудительные доказательства в пользу истинности коперникова учения». Однако приливы, согласно теории,

---

[30] «Диалог». Избр. труды, т. I, стр. 437.
[31] Там же.

выдвинутой Галилеем, доказывали, как ему казалось, что движение Земли имеет абсолютный, истинный, объективный характер. Поэтому в Ватикане считали особенно недопустимым выпячивать эту сторону труда Галилея, подчеркивая теорию приливов.

Теория приливов Галилея вытекает из всего предшествующего содержания «Диалога». В силу относительности инерционного движения невозможно установить движение Земли при помощи твердых тел. Отсюда, по мнению Галилея, следует, что его могут продемонстрировать лишь жидкие массы. Галилей анализирует движение частиц воды на поверхности Земли. Каждая такая частица увлекается Землей при ее суточном вращении. Для наблюдателя, находящегося вне Земли, эта частица 12 часов движется в одну сторону, а затем 12 часов — в обратную. В то же время частица воды движется вперед вместе с Землей, участвуя в ее вращении вокруг Солнца. Таким образом, в течение 12 часов годичное и суточное движения совпадают по направлению, а во вторую половину суток они противоположны. Раз в сутки скорость частицы воды равна сумме скоростей суточного и годичного движений Земли, а через 12 часов скорость равна их разности. Вода в море уподобляется воде, находящейся в трюме большого судна. Когда движение судна ускоряется, уровень воды поднимается у кормы, при замедленном движении вода приливает к носу. В момент, когда суточное движение Земли совпадает с годичным и движение поверхности Земли ускоряется, масса воды устремляется к западу, во вторую половину суток — к востоку.

В сущности, согласно схеме Галилея вода повышает свой уровень при ускорении или замедлении в силу инерции. В явлениях приливов, как их объясняет Галилей, инерция выступает как сила. Превращение инерции в силу свидетельствует об абсолютном характере ускоренного движения. Таким образом, теория приливов ограничивает принцип относительности равномерными движениями. Явления приливов, по Галилею, соответствуют знаменитому ньютоновскому опыту, в котором вода поднималась по краям вращающегося сосуда, и, таким образом, наличием центробежной силы доказывались абсолютный характер вращения и существования абсолютного пространства. Теория приливов Галилея выполняет аналогичную роль. В продолжение беседы второго дня, дискредитировав при

помощи принципа относительности возможность кинематических доказательств космического инерционного движения, Сальвиати должен привести динамические доказательства реальности подобного движения. Нужно доказать, что Земля действительно движется. Ньютону и ученым, жившим после него, доказательством абсолютного движения Земли казалась центробежная сила как результат криволинейного движения земной поверхности. Но для Галилея постоянное по абсолютной скорости криволинейное движение не является ускоренным, криволинейность равномерного движения не вводит в механику понятий ускорения и силы. Поэтому динамическое доказательство абсолютного движения Земли могло быть получено лишь при помощи картины ускорения в криволинейном движении. Такое ускорение получалось при суммировании или вычитании двух движений Земли, установленных гелиоцентрической системой.

По мнению Галилея, приливы, подтверждающие суточное и годовое движение Земли, доказывали абсолютный характер движения Земли и придавали копернианству объективный физический смысл. В ответ на предисловие Осиандера и на попытки изгнать из астрономии критерий объективной истины и свести ее к формальным закономерностям, Галилей выдвигал теорию приливов. Галилей мог многократно говорить о чисто формальном признании коперниканства, но его высказывания в «Диалоге» и в ряде других сочинений лишали эту оговорку всякого значения. Он писал Чези 23 сентября 1624 г.: «Если Земля неподвижна, невозможно, чтобы имели место приливы и отливы; а если Земля движется теми движениями, которые ей уже были приписаны, необходимо, чтобы приливы и отливы имели место со всеми особенностями, которые в них наблюдаются...» [32].

В конце жизни Галилей, осужденный инквизицией на молчание в науке, ослепший, в письме к своему венецианскому знакомому Миканцио вспоминал о приливах Адриатики:

«Когда море входит в канал Маламокко или Дуе Кастелли и разливается, вздувая лагуну за Венецией, за Мурано и за Маргера, вплоть до последних отмелей по направлению к Тревизо, то вслед за тем, при отливе, вода

[32] G. Galilei. Le Opere. Ed. Naz., v. XIII. Firenze, 1930, p. 209.

около Дуе Кастелли или около Маломокко начинает понижаться раньше, чем она начнет понижаться в Венеции, Мурано и в других более отдаленных местах. Из этого явления, если оно происходит именно так, я делаю вывод, что можно дать этому явлению природы название, довольно обычное для других движений воды, а именно, что прилив — одна большая волна, которая движется таким образом, что бесчисленные меньшие воды, называемые у нас барашками, движутся к побережью моря и поверх него, разбегаясь и разливаясь на далекое расстояние, а затем непосредственно, без промежутка покоя, возвращаются назад. Я много раз наблюдал это явление в Венеции и видел, как вода, поднимаясь, движется какими-то ручейками, точно расстилающимися на поверхности, малопомалу убегая и удаляясь от большой воды в смежном канале, и когда кончит убегать, она непосредственно без единого момента покоя обращается, как я видел, назад. Вот так в моих потемках,— заключает слепой Галилей,— я брожу, фантазируя то об одном, то о другом явлении природы, и не могу, как мне хотелось бы, дать хоть некоторый покой моему беспокойному мозгу,— волнение это мне очень вредит, так как заставляет меня почти непрерывно бодрствовать» [33].

Начиная с Галилея, люди по-иному смотрят на природу. Природа представляется им бесконечным полем для исследования, пользующегося земными, мирскими, рациональными методами. Эти методы состоят в объяснении всех явлений природы законами механики. Механика дает универсальное объяснение природе. Это объяснение не имеет границ, и наука развивается на путях механической трактовки так же беспредельно, как беспредельна сама природа. Наука становится бесконечным рядом механических причин и механических следствий. Именно этот круг идей и лежал у истоков механического естествознания, которое было не только суммой отдельных отраслей науки, но и новым мировоззрением широких кругов.

С указанной точки зрения процесс 1633 г. и личная судьба Галилея — существенные факты истории естествознания. В них видна общественная роль творчества и

---

[33] G. Galilei. Le Opere. Ed. Naz., v. XVII. Firenze, 1937, p. 270—271.

мировоззрения Галилея, общественное значение «Диалога». Появление этой книги вызвало бурю. Осенью 1633 г. Галилея вызвали в Рим на суд инквизиции. Больной семидесятилетний старик был арестован и подвергнут допросу. По приговору инквизиции Галилей должен был отречься от еретических идей. До конца жизни он находился под постоянным надзором инквизиции. Ему было запрещено заниматься астрономией, встречаться с учеными и в особенности рассказывать о том, что происходило в помещении инквизиции. В 1642 г. Галилей умер в присутствии Вивиани, Торричелли и представителей инквизиции, которые следили, чтобы перед смертью он не сообщил своим ученикам чего-либо относящегося к астрономическим вопросам. Церковь не разрешила похоронить Галилея в семейном склепе, не разрешила отметить его могилу какой-либо надписью.

Процесс 1633 г. может служить материалом для серьезных исторических заключений, если рассматривать его с точки зрения исторических корней и общественного значения научного творчества Галилея.

Современники Галилея удивлялись, почему он не ушел из шумной и опасной атмосферы боевых споров, полемических памфлетов и публичных выступлений в тишину научных кабинетов. Можно думать, что если бы Галилей не вынес астрономическую дискуссию из уединенных обсерваторий на улицы Флоренции и Рима, его личная судьба была бы иной. Но он не мог этого сделать, оставаясь самим собой. «Инквизиция преследовала Галилея, как общественного борца, а не как ученого»,— говорили впоследствии защитники католицизма. В действительности, общественная борьба и научное исследование неотделимы друг от друга в творчестве Галилея. Инквизиция карала ученого потому, что наука в руках Галилея стала могучей общественной силой, направленной против отживших общественных отношений. Галилей мог избежать преследований инквизиции, если бы он не придал своей научной деятельности общественного характера. Но для этого ему нужно было, во-первых, отказаться от применения телескопа для наглядного, убедительного и доступного широким кругам доказательства новых представлений о мире. Во-вторых, Галилей не должен был строить механическое обоснование новой картины мира, которое в наибольшей степени вырывало науку из-под вла-

сти богословия. В-третьих, Галилей не должен был излагать систему Коперника языком, который сделал его создателем современной итальянской прозы. Одним словом, он мог избежать преследований, лишь перестав быть Галилеем.

Процесс Галилея был началом жестокой реакции, надолго задержавшей развитие естествознания в Италии. После смерти учеников Галилея в истории научного развития страны начался длительный упадок. Весьма скромные достижения науки в этот период не сопоставимы с блестящим началом века. Основная причина — перемещение торговых и индустриальных центров. На этой базе и развернулась деятельность иезуитов и террор инквизиции.

## 6. «Беседы и математические доказательства»

Для стиля, метода и характера научного мышления, для мировоззрения широких общественных кругов, для распространения гелиоцентризма важнейшее значение в творчестве Галилея имел «Диалог». Для развития собственно механики большее значение имела другая книга Галилея.

После приговора Галилей, оставаясь под строгим надзором инквизиции, поселился в Арчетри под Флоренцией. Здесь он и написал «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местным движениям».

В начале 1635 г. книга была закончена, и через четыре года ее удалось напечатать в протестантском Лейдене.

В предисловии к лейденскому изданию объясняется, какие именно новые науки трактуются в «Беседах». Это *динамика* и *сопротивление материалов*.

В книге фигурируют те же собеседники, что и в осужденном «Диалоге». Мы опять встречаем Сальвиати, Сагредо и Симпличио. Симпличио уже не представитель враждебного миросозерцания. Он играет роль вспомогательного персонажа, который своими вопросами и репликами помогает Сальвиати и Сагредо излагать взгляды Галилея. «Беседы» начинаются обменом впечатлениями о венецианском арсенале. «Обширное поле для размышления,— говорит Сальвиати,— думается мне, дает пытливым умам постоянная деятельность вашего знаменито-

го арсенала, синьоры венецианцы, особенно в области, касающейся механики, потому что всякого рода инструменты и машины постоянно доставляются туда большим числом мастеров, из которых многие путем наблюдений над созданиями предшественников и размышлений при изготовлении собственных изделий приобрели большие познания и остроту рассуждения»[34]. Сагредо подхватывает замечание Сальвиати и развивает его, противопоставляя производственные запросы ссылкам и повторениям авторитетов древности.

Дальше завязывается беседа, охватывающая самые разнообразные проблемы. Галилей рассматривал «Беседы и математические доказательства» как свое завещание и включил сюда содержание начатых им в различное время разнообразных исследований.

В начале первого дня «Бесед» ставится вопрос о причинах и мере сил, связывающих воедино части тел. Этот вопрос — характерный пример связи между производственно-техническими интересами того времени и коренными естественнонаучными проблемами. Строение вещества и особенно вопрос о его твердости, связанности его дискретных частей стоит в центре научной картины мира. Вместе с тем в XVII в. этот вопрос имел первостепенное прикладное значение, и в «Беседах» прямо вытекает из вводных замечаний о венецианском арсенале. Сальвиати после первой реплики Сагредо вспоминает о технической задаче, интересовавшей собеседников в свое время в связи с наблюдением кораблестроительных работ в Венеции.

«Вы, синьор, может быть, имеете в виду мой вопрос, заданный тогда, когда мы старались понять причину устройства множества снарядов, подпорок, креплений и иных сооружений для поддержки, пользуясь которыми должны были спустить на воду большую галеру и которых не делают вовсе при спуске менее значительных судов; вы ответили мне, что это делается во избежание опасности поломки судна от давления его собственного громадного веса — опасности, не существующей для малых масс дерева»[35].

---

[34] Г. Галилей. Беседы и математические доказательства. Избр. труды, т. II. М., 1964, стр. 116.

[35] Там же, стр. 117.

Объясняя сцепление элементов тела, Галилей ссылается на «боязнь пустоты» и находит, как ему кажется, способ количественно определить сопротивление образованию пустоты в различных материалах. Вода не может быть поднята насосом более чем на 10 локтей. Подобно этому, «можно легко найти для всех металлов, камня, дерева, стекла и т. д. ту предельную длину цилиндров, которые можно сделать из них в виде нитей или стержней любой толщины, сверх которой они уже не могут держаться и разрываются от собственного веса».

Галилей разъясняет проблему механического подобия. Машина, геометрически подобная другой, меньшей, отличается от нее по механической прочности. Отсюда следует, что совместно с видимыми силами макромира, которые делали бы подобные тела одинаково прочными, действуют силы другого, невидимого мира.

Сальвиати показывает, что боязнь пустоты только частично объясняет сцепление частей тела. В чем же состоит дополнительная причина? Оказывается, что наряду с макропустотами физический мир имеет микропустоты. Микропустоты между частицами вещества связывают их: природа боится пустоты и препятствует увеличению пустот. В сумме эти ничтожные силы вызывают чрезвычайно большую прочность в материалах. Заполнение пустот каким-либо веществом уничтожает сцепление частиц. Такова теория плавления, выдвинутая Галилеем: огонь, проникая в поры между частицами, разъединяет эти частицы, а по устранении огня частицы снова связываются, и расплавленный металл вновь обретает твердость. Впрочем, Галилей не останавливается сколько-нибудь подробно на собственно физических выводах из концепции микропустот. Его интересует общая натурфилософская проблема строения вещества. В этом аспекте главное затруднение теории микропустот состоит в том, что она сводит твердость тел к твердости их частиц и, таким образом, на первый взгляд лишь отодвигает проблему, а не решает ее. Чем объясняется в свою очередь твердость материальных частиц вещества? Наличием еще более дробных частиц и соответственно еще меньших пустот, отвечает Сальвиати. Но весь этот перенос проблемы может продолжаться до бесконечности, говорят его оппоненты. Что же, Сальвиати именно в этом представлении о бесконечной дробимости вещества, бесконечно малых пустотах находит ответ на один из ко-

ренных вопросов естествознания — о природе твердости и прочности тел и связанности их частей воедино.

В дальнейшем разговор посвящен возможности бесконечного числа пустот в конечном теле.

Сальвиати показывает, что самое тонкое дробление тела в тончайший порошок не превращает его в жидкость. Порошок состоит из конечных и делимых частиц. Жидкость отличается от него, заключает Сальвиати, и состоит из бесконечно малых и неделимых частиц. «Отсюда, кажется мне, можно вполне основательно заключить, что частицы воды, из которых она, по-видимому, состоит (более тонкие, нежели любой мельчайший порошок, и лишенные всякой устойчивости), весьма отличны от частиц конечных и делимых, и я не могу найти причины различия иначе, как в том, что они неделимы» [36]. Качественные различия между твердым и жидким телом Галилей объясняет количественной несоизмеримостью конечных и бесконечно малых пустот.

В течение третьего и четвертого дня Сальвиати, Сагредо и Симпличио читают трактат Галилея «О местном движении» и комментируют его.

Некоторые мыслители, говорит Галилей, отмечали ускоренный характер движения падающих тел. Однако никто еще не определил меры ускорения. В отношении брошенных тел криволинейность траектории их движения была установлена до Галилея, но лишь Галилей нашел, что это движение происходит по параболе. «Этим,— говорит Галилей,— будут проложены пути для создания новой обширной и чрезвычайно важной науки, начальные основы которой заложены в настоящей работе и погрузиться в глубокие тайны которой предоставляется пытливым умам последующих ученых».

Трактат «О местном движении» разделяется на три части: в первой рассматривается равномерное движение, во второй — равномерно-ускоренное и в третьей — движение бросаемых тел.

В определение равномерного движения Галилей вносит одну существенную поправку. До него равномерное движение определяли как движение, при котором тело проходит равные расстояния в равные промежутки времени.

---

[36] Г. Галилей. Беседы и математические доказательства. Избр. труды, т. II, стр. 147—148.

Галилей прибавляет к этому определению лишь одно слово: при равномерном движении тело проходит равные расстояния в любые равные промежутки времени. Это слово — «любые» — означает, что скорость может относиться к бесконечно малым отрезкам пути. Если не сделать этой оговорки, «возможно, что в некоторые определенные промежутки времени будут пройдены равные расстояния, в то время как в равные же, но меньшие части этих промежутков пройденные расстояния не будут равны» [37].

Таким образом, Галилей делает существенный шаг, приближаясь к современному представлению о скорости как о пределе отношения между пройденным путем и временем. При равномерном движении скорость не меняется в течение любого промежутка времени, каким бы ни был этот промежуток.

Далее Галилей говорит о естественном ускоренном движении — падении тел. С точки зрения Галилея, можно изучать любые виды ускоренных движений, но он решает ограничиться действительно существующим в природе универсальным ускоренным движением. Поэтому можно сравнивать теоретические выкладки с эмпирическими наблюдениями.

Обсуждая параграфы трактата, посвященные равномерному ускорению, собеседники разъясняют апорию непрерывного движения, вводя понятие скорости в данной точке. Когда Сальвиати рассказывает о непрерывном нарастании скорости, Симпличио замечает, что так как степени возрастающей или убывающей скорости бесчисленны, то тело никогда не сможет пройти их полностью. Камень, подброшенный вверх и постепенно уменьшающий скорость своего движения, никогда не пришел бы к покою, но пребывал бы в бесконечном постоянно замедляющемся движении. Сальвиати разбивает этот древний парадокс простым указанием на бесконечно малые размеры мгновения, когда тело проходит через определенную степень скорости.

«Это случилось бы, синьор Симпличио, если бы тело двигалось с каждою степенью скорости некоторое определенное время; но оно только проходит через эти степени, не задерживаясь более чем на мгновение; а так как в каж-

---

[37] Г. Галилей. Беседы и математические доказательства. Избр. труды, т. II, стр. 234.

дом даже самом малом промежутке времени содержится бесконечное множество мгновений, то их число является достаточным для соответствия бесконечному множеству уменьшающихся степеней скорости» [38].

В изложении своей динамики Галилей идет от равномерного движения к ускоренному, переходя от скорости к ускорению. Но исторически исходным пунктом новой динамики является именно понятие ускоренного движения. Первоначальное представление о скорости — это представление о сроке, в продолжении которого тело перешло из одной пространственной точки в другую, или о расстоянии, пройденном телом в течение определенного срока. Иначе говоря, первоначальное традиционное представление о скорости определяет ее как частное от деления пройденного пути на время. Эта величина ничего не говорит о скорости тела в данной точке и поэтому вытекает из представления о равномерном движении. На практике постоянно приходилось иметь дело с ускоренным движением, и прежде всего с падением тела; именно поэтому Галилею скорость представляется непрерывно меняющейся величиной. Он, как мы видим, разрешает парадоксы движения, отмечая, что определенная скорость свойственна бесконечно малому отрезку пути. Соответственно должно было измениться и понятие скорости. Оно должно было получить дальнейшее развитие в соответствии со всем духом галилеевской динамики. Для Галилея скорость — это отношение бесконечно малого элемента пути к бесконечно малому элементу времени. Такое представление о скорости шире, чем первоначальное. Из него можно получить в частном случае старое представление о скорости, соответствующее равномерному движению. Галилей не сформулировал такого определения скорости, но он в действительности постоянно пользовался им. Понимание скорости как предела, к которому стремится отношение пути к времени при бесконечном уменьшении того и другого, вытекает из идеи непрерывного изменения скорости, из понятия ускорения.

В дальнейшем разговоре Сальвиати высказывает очень интересную с исторической стороны концепцию Галилея. Галилей считал возможным изучать падение тел, устранив проблему физических причин тяготения.

---

[38] Г. Галилей. Беседы и математические доказательства. Избр. труды, т. II, стр. 242.

«Мне думается,— говорит Сальвиати,— что сейчас неподходящее время для занятий вопросом о причинах ускорения естественного движения тел, по поводу которого различными философами было высказано столько различных мнений; одни приписывали его приближению к центру, другие — постепенному частичному уменьшению сопротивляющейся среды, третьи — некоторому воздействию окружающей среды, которая смыкается позади падающего тела и оказывает на него давление, как бы постоянно его подталкивая; все эти предположения и еще многие другие следовало бы рассмотреть, что, однако, принесло бы мало пользы» [39].

Это зачаточная форма ньютоновской физики принципов: Галилей не рассматривает физических причин падения и продолжает математическую разработку вопроса. Он определяет равномерно-ускоренное движение как такое, «при котором в равные промежутки времени прибавляются и равные моменты скорости» [40].

При равномерно-ускоренном движении пройденный путь пропорционален квадрату времени. К этой формуле можно прийти, разбивая время на очень малые промежутки. Доказательство указанной формулы становится строгим лишь в свете учения о бесконечно малых.

Далее Галилей излагает законы падения тел. Основной закон падения, впрочем, был высказан несколько раньше, в конце первого дня беседы, в связи с проблемами вакуума, когда Галилей разбивает аргументы Аристотеля против существования пустоты. Для Аристотеля скорость движения обратно пропорциональна плотности среды. Поэтому в пустом пространстве с нулевой плотностью, с полным отсутствием сопротивления движению, последнее приобрело бы бесконечную скорость и тело прошло бы через пустоту мгновенно. Из невозможности подобного движения Аристотель выводит невозможность пустоты. Галилей отвечает на этот аргумент, развивая учение о конечной и постоянной скорости падения тел в пустоте. Представление, будто тяжелые тела падают быстрее легких, опровергается очень простым мысленным экспериментом. Большой камень движется со скоростью, равной восьми, другой, меньший, более

---

[39] Г. Галилей. Беседы и математические доказательства. Избр. труды, т. II, стр. 243—244.

[40] Там же, стр. 240.

легкий камень падает со скоростью, равной четырем. Соединив их вместе, мы получаем тело, которое падает со средней скоростью, меньшей восьми. Однако два камня вместе составляют тело более тяжелое, чем первоначальное. Таким образом, получается, что более тяжелое тело движется с меньшей скоростью, чем более легкое. Этот метод доказательства применяли еще средневековые номиналисты. Альберт Саксонский говорил, что десять камней должны падать с той же скоростью, что и один камень. Отсюда идет приведенное доказательство Галилея.

Далее Галилей в небольшом отступлении высказывает чрезвычайно интересную мысль. Симпличио, возражая Сальвиати, указывал, что малый камень, присоединенный к большому, увеличивает вес последнего и соответственно увеличивает скорость падения. Сальвиати отвечает, что присоединение добавочного груза может не увеличить вес. Необходимо иметь в виду различие между покоящимся и движущимся телом. Неподвижное тело, лежащее на весах, будет давить на весы сильнее, если на него положить другое тело. Если же тело свободно падает в пространство, то положенное на него другое тело не увеличивает веса.

«Мы чувствуем тяжесть на плечах, когда сопротивляемся движению, к которому стремится давящая тяжесть; но если мы бы опускались с такою же скоростью, с какою перемещается свободно падающий груз, то каким образом тяжесть могла бы давить на нас? Не видите ли вы, что это подобно тому, как если бы мы хотели поразить копьем кого-либо, кто бежит впереди нас с равною или большей скоростью?» [41].

В системе, движущейся с ускорением, равным ускорению свободно падающих тел, не может быть никаких физических явлений, в которых проявляется тяготение. Тела не испытывают ускорения относительно этой системы и как бы теряют свой вес. Здесь исходный пункт ряда динамических картин и заключений, которые много позже приобрели огромное значение. Галилею, разумеется, не хватает многих понятий динамики, чтобы пойти дальше по этому пути.

С методологической стороны интересны последующие страницы «Бесед», где Галилей объясняет различие между

---

[41] Г. Галилей. Беседы и математические доказательства. Избр. труды, т. II, стр. 166.

существенным и несущественным в видимых явлениях; Симпличио говорит, что в действительности легкие тела падают медленнее, чем тяжелые.

«Я не хотел бы,— отвечает ему Сальвиати, чтобы вы поступали, как многие другие, отклоняя беседу от главного вопроса, и придирались к выражению, в котором я допустил отклонение от действительности на один волосок, желая скрыть за этой небольшой погрешностью ошибку другого, грубую, как якорный канат» [42].

Допущенное Сальвиати отклонение от истины связано с влиянием среды, искажающей простой закон падения. При выявлении этого простого и общего закона следует мысленно устранить искажающие случайные обстоятельства, к каким относится сопротивление среды. Разумеется, в таком игнорировании среды как случайного обстоятельства заключена концепция, созданная длительным эмпирическим наблюдением и практическим применением процессов, в которых принимается в расчет и используется вес, а трение, сопротивление воздуха и т. д. оказываются случайными, вредными и подлежащими устранению побочными обстоятельствами.

В течение третьего дня беседы законы падения разбираются подробнее. Речь идет о пропорциональности между скоростью падения и временем, прошедшим от его начала, а затем говорится, что путь, пройденный телом, пропорционален квадрату времени. От законов свободного падения тел разговор переходит к теории наклонной плоскости, где законы динамики приобретают форму, допускающую экспериментальную проверку.

Остановимся на идее инерции, как она высказана в «Беседах».

В одном из первых абзацев главы «О движении бросаемых тел» сформулирован принцип инерции: «Когда тело движется по горизонтальной плоскости, не встречая никакого сопротивления движению, то, как мы уже знаем из всего того, что было изложено выше, движение его является равномерным и продолжалось бы бесконечно, если бы плоскость простиралась в пространстве без конца» [43].

Можно подумать, что речь идет о законе прямолиней-

---

[42] Г. Галилей. Беседы и математические доказательства Избр. труды, т. II, стр. 166.

[43] Там же, стр. 304.

ного инерционного движения. Но на самом деле плоскость в «Беседах» та же, что и в «Диалоге». Она соответствует поверхности земного шара; только здесь в пределах земной механики речь идет не об астрономических наблюдениях как эмпирической базе законов механики, а о строительстве, баллистике и т. д., и Галилей рассматривает кривизну земной поверхности как несущественное обстоятельство.

Еще раньше он говорил, что отвесные направления в разных точках поверхности Земли рассматриваются как параллельные. Этот вопрос имел уже до Галилея длительную историю. Сторонники математической строгости учитывали непараллельность сил тяжести даже в теории рычага; ученые, стоявшие ближе к практическим проблемам, отказывались от такого ригоризма.

Галилей примыкает к тому направлению в механике, которое отказывается принимать во внимание кривизну Земли и конечность земного радиуса как в вопросе о параллельности вертикальных сил тяжести, так и в вопросе о тождестве поверхности Земли с плоскостью.

Что же, собственно, подлежит исключению, что оказывается несущественным для решения задачи о движении бросаемого тела? Исходным понятием учения Галилея о бросаемом теле является движение тела, сохраняющего одинаковое расстояние от центра Земли. Это и есть инерционное движение. При небольших расстояниях это направление можно рассматривать как прямую линию и тогда движение брошенного тела совпадает с параболой. В действительности благодаря кривизне земной поверхности траектория брошенного тела отличается на некоторую ничтожную величину от параболы.

Земные масштабы механики «Бесед» позволяют Галилею пользоваться здесь представлением об инерционном прямолинейном движении, не вступая в противоречия с ранее высказанным представлением о криволинейности инерционного движения.

Выше, на примере понятия равной скорости падения различных тел, мы видели, что физической предпосылкой динамики XVII в. было представление о пустоте. То же самое видно в теории инерционного движения. Леонардо да Винчи и другие мыслители догалилеевских времен, вплотную подходившие к принципу инерции, не могли сделать последнего шага, так как отказывались представить

себе движение в абсолютной пустоте, где движущееся тело не встречает никаких препятствий. Динамика XVII в. в лице Галилея объявила сопротивление среды несущественной стороной своих законов. Впоследствии равные ускорения падающих тел, так же как и сохранение скорости инерционного движения, стали чуть ли не очевидным фактом, но в начале века подобное утверждение, напротив, казалось противоречащим очевидности. Доказательство несущественности сопротивления показывает исторические корни этой важнейшей абстракции и одновременно общие корни механики XVII в.

Производственная механика XVII в., во-первых, не требовала количественного анализа сопротивления среды, а во-вторых, не могла решить эту задачу. Во времена Галилея в связи с уровнем развития техники и экспериментальной физики это сопротивление могло рассматриваться в качестве несущественного обстоятельства. Артиллеристы, изучая практическую баллистику, могли оставлять в стороне сопротивление воздуха; с другой стороны, физика накопляла доказательства существования вакуума. Конструирование насосов и опыты, показавшие реальную возможность вакуума, относятся к позднейшему периоду, но уже во времена Галилея накопилось достаточно эмпирических наблюдений, позволяющих рассматривать законы падения и инерции, мысленно представляя себе тело движущимся в пустоте.

Таковы основные принципы динамики Галилея. Следует добавить, что Галилей высказал мысль о динамическом обосновании статики. Оно состоит в принципе виртуальных перемещений. Изучая равновесие механических систем, Галилей рассматривает его как частный случай движения и исследует условия равновесия, исходя из возможного нарушения равновесия. При нарушении равновесия точки механической системы переместились бы в известных направлениях. Эти возможные перемещения, получившие впоследствии название виртуальных,— исходный пункт динамического анализа условий равновесия. Уравновешивающие силы относятся друг к другу обратно пропорционально виртуальным перемещениям. Исходя из этого принципа, Галилей приходит к законам статики, в частности, к принципу рычага. Если две силы действуют на различные по длине плечи рычага первого рода, то в случае нарушения равновесия плечи рычага известным образом

переместятся. Приложенные к плечам рычага уравновешивающие друг друга силы должны быть обратно пропорциональны этим виртуальным перемещениям. Продолжая анализ условий равновесия, Галилей рассматривает отношение между силой и перемещением для равновесия на наклонной плоскости и в полиспасте. Общим принципом является обратная пропорциональность между уравновешенными силами и возможными перемещениями. Отсюда вытекает, что произведение силы на путь, пройденный телом, т. е. работа, не может быть увеличено никакой машиной, и все, что выигрывается в силе, теряется в расстоянии.

Динамика Галилея включала первые, подчас неопределенные понятия, ставшие исходным пунктом систематической разработки механики и физики. Понятия инерции, скорости в данной точке, ускоренного движения, сложения ускоренного движения с равномерным еще не вполне установились, они применяются в различном смысле. Сама мысль о непрерывности материи и движении, игравшая такую большую роль в учении о веществе и в динамике Галилея, не была сформулирована как универсальная, окончательная предпосылка изучения природы. Воззрения Галилея включали вместе с тем представление о силах и о пустом пространстве. Следующий шаг состоял в представлении о материи, лишенной каких-либо других свойств, кроме геометрических.

# II. КИНЕТИЗМ

## 1. Исходные идеи картезианской физики

Картина мира, нарисованная Галилеем в «Диалоге», была единой, охватывающей все мироздание, картиной инерционных движений. В своем дальнейшем развитии наука должна была показать космические ускорения и найти их причины. «Беседы и математические доказательства» содержали некоторые необходимые для этого понятия земной механики, но Галилей не перенес их в космос. «Диалог» и «Беседы» были далеко еще не слившимися элементами нового, более точного и конкретного представления о мире. Ближайшие поступательные шаги науки позволили объединить идеи «Диалога» с теорией ускоренного движения, и прежде всего с теорией падения тяжелых тел, изложенной в «Беседах». Для этого требовалось более точное определение инерции, представление о сохранении не только абсолютной скорости, но и направления инерционного движения.

Кроме этой, совершенно необходимой предпосылки механического объяснения космических явлений практика накопила наблюдения, позволившие сформулировать идею сохранения количества движения при упругих ударах тел. Эта идея, перенесенная в микромир, казалось, открыла возможность механического истолкования качественных изменений, принципиальную возможность механического объяснения теплоты, звука, упругости газов, света, электричества, тяготения, химических превращений вещества и, наконец, явлений, происходящих в живых организмах. Представление о невидимых движениях, подчиненных законам механики, позволило далее нарисовать историческую картину Вселенной, картину возникновения и изменения Вселенной, Земли и земной коры.

Существовало, однако, коренное различие между астрономическими явлениями, с одной стороны, и физико-химическими, геологическими и биологическими — с другой. Движения небесных тел были изучены со сравнительно большой точностью еще в то время, когда не было телескопов, а после Галилея астрономия быстро превратилась в науку, оперирующую количественными понятиями и точными измерениями, допускающими широкую и плодотворную математическую обработку. В ином положении находились физические, химические, геологические и биологические явления.

В начале XVII в. в этой области эксперимент был по преимуществу качественным. Учению об электричестве предстояло лишь через полтораста лет дойти до количественных экспериментов. Перед теорией тепла лежал почти такой же длинный путь до появления точных термометров. Химики только начали применять весы, а количественные наблюдения, преобразовавшие химию, были сделаны лишь в середине XVIII в. Соответственно минералогия не могла выйти из стадии первоначальных качественных описаний. Различные отрасли естествознания находились в неодинаковом положении в смысле возможности количественного исследования. Оптика, например, развивалась в непосредственной связи с астрономией и продвинулась далеко вперед по сравнению с другими отраслями.

Создалось такое положение, когда сравнительно разработанная к тому времени теория движения твердых тел могла быть применена к объяснению физико-химических и биологических явлений лишь при помощи большого числа гипотез.

Декарт предпринял смелую попытку объяснения всех известных тогда явлений природы движением тел, создав, таким образом, картину мира, где не было ничего, кроме движущейся материи. Картина эта охватывала и космос, и микрокосм. Она обобщила гигантскую массу эмпирических наблюдений, во многих случаях включала правильные объяснения физических, химических и физиологических явлений и вместе с тем содержала немало фантастических построений.

Картезианская физика появилась почти одновременно с динамикой Галилея, но в несколько иной исторической среде. Историческая судьба работ Декарта и его ближай-

ших последователей, воздействие картезианской физики на умственное развитие Европы, конкретные перипетии идейной борьбы — все это во многом зависело от экономических, политических и культурных условий, создавшихся во Франции и в Нидерландах в первой половине XVII в., в период, последовавший за нидерландской революцией, а во Франции характеризовавшийся усилением оппозиционной мысли, направленной против иезуитов и богословской схоластики.

Декарт был современником и свидетелем появления сравнительно крупных мануфактур во Франции и в Нидерландах. Во Франции выросли «королевские мануфактуры» — крупные предприятия с десятками рабочих и с большими силовыми установками. В Нидерландах большие суконные мануфактуры и другие очаги мануфактурного производства стали опорой научно-технического прогресса. Декарт в течение всей своей жизни интересовался техническими вопросами мануфактурного производства. Он был тесно связан с буржуазными кругами. Ряд выходцев из третьего сословия был подготовлен Декартом к научной деятельности. Декарт разрабатывал учебные планы специальных школ для подготовки ремесленников. Еще большее значение имел тот факт, что Декарт писал научные работы на французском языке и, таким образом, подобно Галилею, обращался не к замкнутой группе схоластов, а к новым, нецеховым кругам.

Историческая связь картезианства с развитием прикладной механики сравнительно ясна. Сложнее его связь с классовой борьбой буржуазии против дворянства.

Годы жизни Декарта — время неуклонного усиления королевской власти во Франции. В свое время буржуазия была довольна тем, что самодержавная власть обуздала своевольных феодалов. Но теперь она хотела вырвать у короля некоторые права и льготы. Небольшая кучка наиболее богатых купцов и ростовщиков добивалась прибыльных сделок с двором. Но более широкие круги промышленников и торговцев роптали. В середине XVII в. они попытались выступить против абсолютизма, но это движение было очень робким. При этом оно не было направлено против религии, а лишь стремилось несколько ограничить влияние католической церкви. Королевская власть подавляла оппозиционные выступления буржуазии, опираясь на помощь духовенства. Энергичными защитниками и

агентами королевской власти были иезуиты. Они служили правительству, боролись против распространенных среди буржуазии ересей, захватывали в свои руки школы и всячески защищали средневековую схоластику. Борьба против схоластики была частью борьбы буржуазии против абсолютизма.

Учение Декарта способствовало этой борьбе, хотя сам Декарт не хотел участвовать в общественных столкновениях, боялся церкви, боялся иезуитов даже в протестантской Голландии, где он провел двадцать лет жизни. Суд над Галилеем особенно сильно напугал Декарта. После осуждения Галилея Декарт избегал говорить о движении Земли вокруг Солнца, боялся затрагивать церковные догмы. Но картезианство оказалось оружием в руках буржуазии, оружием, направленным против церкви — опоры абсолютной монархии.

В Голландии картезианство также стояло в центре общественной борьбы. Здесь после нидерландской революции 1572—1609 гг. наука была несколько свободнее от церковного влияния, ученым дышалось легче, чем в других европейских странах. Голландия была в то время сравнительно передовой страной. После того как торговые пути прорезали Атлантический океан и заморская торговля оказалась в основном направленной уже не на Восток, а на Запад, наибольшие торговые выгоды получили вначале голландцы. В Голландии выросли мануфактуры, и их изделия распространялись по всей Европе. Когда нидерландская революция освободила северную часть Нидерландов от испанцев и католического духовенства, развитие промышленности пошло быстрее, и это дало большой толчок развитию науки. Однако в середине XVII в., добившись независимости от католицизма и испанцев, голландская буржуазия страшилась своего собственного народа. Народные массы Голландии были беднее и терпели гнет более жестокий, чем народные массы всей остальной Европы. Восстания бедноты потрясали страну, и защита религии становилась все более важной задачей господствующих классов.

Протестантские богословы, подобно своим католическим собратьям, канонизировали перипатетическую догму. Выступая против Декарта, утрехтский пастор Боэций писал: «Философия, которая отвергает субстанциальные формы вещей с их собственными специфическими свойст-

вами, отвергает, следовательно, отличную специфическую натуру вещей..., не может быть согласована ни с физикой Моисея, ни со всем, чему учит писание. Эта философия опасна, она благоприятна скептицизму, способна разрушить наши верования касательно разумной души, происхождения лиц святой троицы, воплощения Иисуса Христа, первородного греха, чудес, пророчеств, благодати нашего возрождения, действительности демонов».

Первым изложением физики Декарта является «Мир или трактат о свете» (1622—1632 гг.). Здесь еще не чувствуется тот страх перед теологами, который впоследствии после осуждения Галилея, связал, если не мысль, то язык философа, но именно поэтому опубликование «Трактата о свете» задержалось надолго. Он был напечатан лишь в 1664 г. после остальных важнейших сочинений Декарта.

Чтобы избежать преследования церкви, Декарт с самого начала предполагал написать свой труд в виде фантастического романа о воображаемом мире. Однако, когда трактат был закончен, Декарт узнал о процессе Галилея. Отказавшись от выпуска «Трактата о свете», Декарт решил изложить свои физические взгляды в еще более осторожной и условной форме. Изложенное таким образом учение Декарта оказалось все же в центре общественной борьбы. Идеологические запросы французской буржуазии требовали широкой, всеохватывающей антисхоластической декларации, направленной против учения иезуитов. Новые общественные силы нашли такую декларацию в физике Декарта. Перечитывая сейчас сочинения мыслителя, насмерть перепуганного католической реакцией, мы обнаруживаем решительный вызов традиционным взглядам, последовательное стремление объяснить всю природу чисто механическими причинами. «Скрытые свойства» перипатетиков — основная мишень для стрел Декарта. Его единомышленники Антуан Арно и Пьер Николь, выдающиеся деятели янсенизма и борцы против иезуитов, в своей «Логике, или искусстве мышления» проявляли еще больше полемического темперамента в борьбе против «скрытых свойств».

«Мы предпочитаем,— писали они,— измышлять воображаемые причины подлежащих объяснению вещей вместо того, чтобы признаться, что их причины нам неизвестны, и манера, с помощью которой мы уклоняемся от этого при-

знания, весьма забавна. Видя какое-либо действие, причина которого нам неизвестна, мы воображаем, будто открыли ее, присоединив к этому действию общее слово „сила" или „способность", которое не образует в нашем уме никакой иной идеи, кроме той, что это действие имеет некую причину, что нам было хорошо известно и до того, как мы прибегли к этому слову. Так, например, все знают, что наши артерии пульсируют, что железо, находясь вблизи магнита, соединяется с ним, что кассия слабит, что опий усыпляет. Тот, кто не является ученым по профессии и не стыдится незнания, откровенно признается, что ему известны эти явления, но неведома их причина, ученые же, которые не могут без краски стыда заявить об этом, выходят из положения иным образом и претендуют на открытие истинной причины этих действий, заключающееся будто бы в том, что артериям присуща сила пульсирования, магниту — магнетическая сила, кассии — сила слабительная, а опию — снотворная. Это в высшей степени удобно, и любой китаец мог бы с такой же легкостью преодолеть изумление, которое вызвали у него на родине привезенные из Европы часы. Для этого ему нужно было бы заявить, что он в совершенстве знает то, что другие находят столь изумительным, и все дело в том, что часы обладают *указательной* силой, обозначающей часы на циферблате, и *звуковой* силой, вызывающей бой часов. Этим путем он приобрел бы такую же ученость в познании часов, какою наши философы обладают в познании пульсации артерий, свойств магнита, кассии и опия» [1].

Именно отсюда Мольер черпал мотивы своей сатиры на перипатетиков.

Антидогматическая, янсенистская оппозиционная мысль XVII в. брала у Декарта аргументы против «скрытых свойств» перипатетиков. Но картезианские аргументы били гораздо дальше. Если всю природу можно объяснить действием механических причин, то богу остается небольшая роль: он лишь создает материю и приводит ее в движение.

«Я не могу,— писал Паскаль,— простить Декарту следующего: во всей философии он охотно бы обошелся без бога, но не мог удержаться, чтобы не дать ему щелчка по

[1] A. Arnault, P. Nicole. La logique ou l'art de penser. Paris, 1664, ch. XIX, § 3.

носу, заставив его привести мир в движение. После этого он более уже никаких дел с богом не имел» [2].

Поэтому не только церковь, но даже ее противники, деисты, выступали против картезианства. Вольтер вкладывает в уста Декарта следующее обращение к богу:

Ваш мир,— хоть он и блещет красотой,—
Но коль угодно вам, слеплю и я такой:
Материи кусок... и я, сомнений нет,
Создам стихии все, животных, вихри, свет,—
Узнать бы только мне движения закон...

В своей физике Декарт говорил о материи — только о ней. Он полностью изгонял из материального мира все, кроме протяженности, и отождествлял материю с пространством. Тело, говорил Декарт,— это протяженная субстанция, тело и пространство тождественны. Тело является ограниченной частью пространства — пространственной областью. В физике Декарта нет ничего, кроме размеров, формы, положения и движения тел. Природа материи состоит в трехмерной протяженности. Остальные свойства тел могут быть отняты у них, и все же тела́ сохраняют свое существование. Декарт говорил, в частности, о твердости тел, как о свойстве, исчезающем, когда тела движутся с той же скоростью, что и осязающие их руки. Аналогично и прочие качественные свойства тел могут быть отняты у них.

Декарт доказывал, что сведе́ние природы вещества к протяженности не противоречит разрежению и сгущению вещества. Эти процессы представляют собой лишь изменение формы тела. В разреженных веществах между частицами существуют поры, промежутки, заполненные другими телами. Когда частицы, сближаясь, уменьшают размеры пор, другие тела покидают их, однако само тело при этом не меняет своего объема, своей протяженности. «Так, видя губку, взбухшую от воды или иной жидкости, мы не считаем вследствие этого отдельные ее части более протяженными, чем когда она сжата и суха, в первом случае она имеет только большие поры или промежутки между частицами» [3].

Декарт предлагает отбросить от идеи какого-либо тела все, что не принадлежит к его природе. Прежде всего от-

---

[2] B. P a s c a l. Pensées, I. Paris, 1852, p. 41.
[3] Р. Д е к а р т. Избранные произведения. М. — Л., 1950, стр. 476.

брасывается твердость, так как тела могут дробиться или разжижаться. Далее отбрасывается цвет, поскольку можно представить себе прозрачные тела. Тяжесть также попадает в число отбрасываемых, вторичных свойств, так как Декарт считает огонь лишенным тяжести. Температура тела устраняется, ибо тепло и холод отнюдь не требуются, чтобы тело сохранило свое реальное бытие. Истинная идея тела «состоит в одном том, что мы отчетливо видим в нем субстанцию, протяженную в длину, ширину и глубину, то же самое содержится и в нашей идее о пространстве, причем не только о пространстве, заполненном телами, но и о пространстве, которое именуется пустым» [4].

Непроницаемость отнюдь не отличает материю от пространства. Напротив, непроницаемость совпадает с неистребимостью, неуничтожаемостью самого пространства. Декарт указывал на невозможность совмещения двух частей пространства. Отсюда, по его мнению, вытекает реальное и материальное бытие пространства. Оппоненты Декарта считали непроницаемость признаком материи, отличающим ее от пустоты, от пространства, не заполненного материей. Для Декарта чистая протяженность обладает теми же свойствами. Поэтому он говорил о материальности всякой протяженности.

Пьер Режи высказал в очень ясной форме мысль Декарта о неуничтожаемости пространства, совпадающей с непроницаемостью материи. Он писал, что нельзя прибавить кубический дюйм пространства к другому кубическому дюйму, чтобы не получилось два кубических дюйма [5]. Действительно, эта количественная характеристика пространства не только служит основой понятия непроницаемости материи в картезианской физике, но и совпадает с понятием непроницаемости.

Декарт борется против представления о пространстве, как о некотором пустом сосуде, который заполняется предметами. Он хочет показать, что сосуд именуется пустым лишь в условном смысле. В обычном словоупотреблении под пустотой разумеют отнюдь не абсолютную пустоту. Сосуд для воды считается пустым, если вода

---

[4] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 470.

[5] См. «Cours de philosophie selon les principes de M. Descartes». v. 1. Amsterdam, 1861, p. 291.

в него не налита, рыбный садок пуст, когда он заполнен водой, но рыбы в нем нет, корабль мы называем пустым, если он заполнен лишь балластом. Подобным образом, говорит Декарт, мы называем пустым пространство, в котором нет ощущаемых предметов. Однако материальная субстанция может заполнять пространство, не оказывая воздействия на наши органы чувств. Поэтому нельзя думать, будто в пространстве, в котором ничто не воздействует на наши органы чувств, действительно ничего нет.

Декарт приводит в качестве примера некоторый сосуд. Если этот сосуд пуст абсолютно, т. е. между его стенками не содержится никакого материального тела, то это значит, что между стенками вообще ничего нет, что эти стенки соприкасаются друг с другом.

В физике Декарта из тождества пространства и материи вытекает, что материя бесконечно делима. Существование неделимых атомов исключено.

Из того же тождества материи и пространства вытекает и экстенсивная бесконечность мира. Далее из основной предпосылки Декарта вытекает тождественность материи. «Отсюда следует, что не может быть многих миров, ибо мы теперь с очевидностью постигаем, что материя, природа которой состоит в одной только протяженности вообще, занимает все вообразимые пространства, где те или иные миры могли бы находиться, а идеи какой-либо иной материи мы в себе не находим» [6].

Отождествление пространства и материи проходит через всю картезианскую физику. Декарт утверждает, что перемещение частей пространственной субстанции, взаимное перемещение тел, движение — причина всех явлений, причем каузальная связь исчерпывается воздействием друг на друга различных частей пространства — физических тел. Стремясь доказать универсальность такого объяснения природы, Декарт нагромождает одну гипотезу на другую и в результате видит всю природу, логически выведенную из исходных пространственных определений. Один из последних параграфов «Начал философии» имеет характерное название: «Нет ни одного явления природы, не вошедшего в то, что было объяснено в настоящем трактате» [7]. Геометрический метод изучения природы при

---

[6] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 476.
[7] Там же, стр. 535.

помощи чисто пространственных понятий, по мнению Декарта, вовсе не приводит к произвольным гипотезам, напротив, он дает абсолютные, определенные, единственно возможные ответы на любые вопросы науки. Но в действительности задача Декарта отнюдь не состояла в подлинно однозначном ответе на каждый частный вопрос науки. В третьей части «Начал философии» он говорил, что движения частиц материи, лежащее в основе явлений природы, могут быть различными: «...мы вольны предположить любые способы, лишь бы все вытекающее из них вполне согласовывалось с опытом» [8].

Согласуемая с опытом причина явления может заключаться лишь в движении тел. Это, по мнению Декарта, не гипотеза, а непререкаемая истина, единственно возможная, доказываемая всей наукой в целом. Доказательство оперирует частными *гипотетическими* утверждениями. Декарт стремился показать, что если допустить существование протяженной субстанции, подчиняющейся кинетической причинности, то из нее можно вывести все явления природы, не прибегая к некинетическим понятиям. В «Трактате о свете» он поместил главу, которая называется «Описание нового мира и качеств той материи, из которой он состоит». В начале этой главы говорится:

«Отрешитесь на некоторое время от этого мира, чтобы взглянуть на новый, который я хочу одновременно с этим создать в воображаемых пространствах. Философы говорят, что эти пространства бесконечны. Конечно, следует с этим согласиться, потому что они-то и создали их. Но чтобы эта бесконечность нам не мешала и не поглотила нас совершенно, не будем стремиться идти до конца, пойдем только так далеко, чтобы у нас исчезло из вида все, созданное богом пять или шесть тысяч лет назад. После того как мы остановимся там на каком-нибудь определенном месте, предположим, что бог создал вокруг нас столько материи, что в какую бы сторону ни обратился наш взор, все было бы заполнено этой материей» [9].

Далее развертывается знаменитый «роман природы». Из существования материи, тождественной с пространством, выводится возникновение частиц, элементов, небесных тел, физико-химических процессов, организмов —

---

[8] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 511.
[9] Там же, стр. 193.

самых сложных сочетаний движущихся частиц разнообразной формы. Декарт рисует эти сложные сочетания, не смущаясь отсутствием данных для однозначных построений, прибегая к самым произвольным гипотезам. Для ученых следующего поколения ценность гипотезы определялась ее общностью, широтой круга явлений природы, становившихся объяснимыми при допущении одной и той же гипотезы. В этом состоял тот критерий «изящества», который в явной или неявной форме играл существенную роль в научной литературе, начиная с конца XVII в. Для Декарта ценность гипотезы состоит в другом. Гипотеза должна дать механическое истолкование любому физическому, химическому или физиологическому явлению. При этом вовсе не страшно, если гипотеза создана ad hoc и объясняет лишь данное явление. Гипотезы можно нагромождать одну на другую, и требование общности не является при этом решающим. Общность, универсальность характеризуют только основную предпосылку всей физики Декарта — тождественность вещества и пространства. Чем более сложным и *качественным* представляется данный физический процесс, тем бóльшая заслуга принадлежит гипотезе, которая дает ему чисто кинетическое истолкование. Поэтому Декарт считал особенной своей удачей объяснение вкуса соли острой, игольчатой формой ее частиц. Действительно, качественная характеристика соли получила здесь механическое объяснение при помощи чисто геометрических определений формы частиц. Произвольность этой гипотезы не тревожила Декарта и его сторонников. Картезианцы не слишком заботились об однозначности частной физической теории. Важно было доказать принципиальную возможность универсального механического объяснения природы, универсальной картины мира, в которой нет ничего, кроме движущейся материи. Физический мир построен из протяженной субстанции, и никакая другая субстанция не может рассматриваться в физике. Частные теории могли быть различными, лишь бы они оставались в пределах кинетического объяснения явлений.

Научный подвиг Декарта не имеет аналогий: Декарт действительно повторил всю работу бога, не пользуясь чудесами. Построив совершенно комплектный мир, он показал, что механика может целиком и полностью объяснить явления природы. Совершая этот подвиг, Декарт не имел ни времени, ни нужды ограничивать свои построения

строго доказанными, однозначными, единственно возможными картинами. Физика Декарта — роман природы. Но это очень тенденциозный и очень назидательный роман, в котором вымышленные перипетии создают правдивый образ целого, ведут к истине, к правильным выводам. Таким выводом была общая картина движущейся материи как универсальной причины всех без исключения явлений природы. В предисловии ко второму изданию ньютоновских «Математических начал натуральной философии» Котс говорил о картезианцах: «Заимствующие основания своих рассуждений из гипотез, даже если бы все дальнейшее было ими развито точнейшим образом на основании законов механики, создали бы весьма изящную и красивую басню, но все же лишь басню» [10]. Конечно, это тирада вызвана антикартезианским фанатизмом Котса и в целом несправедлива; если в физике Декарта есть элементы, которые заслуживают такой характеристики, то даже они представляют собой басню не только изящную, но и глубоко поучительную, с однозначным и правдивым *общим* выводом. Разумеется, уже в XVIII в. такой вывод был недостаточен.

## 2. Картезианская теория движения

В «Трактате о свете» Декарт противопоставляет представление о движении как о непрерывном перемещении традиционному перипатетическому взгляду.

«Философы также предполагают множество движений, которые, по их мнению, могут происходить без перемены места. Подробные движения они называют motus ad formam, motus ad calorem, motus ad quantitatem [движение к форме, движение к теплоте, движение к количеству] и тысячью других названий. Из всех этих движений я знаю только одно, понять которое значительно легче, чем линии геометров. Это движение совершается таким образом, что тела́ переходят из одного места в другое, последовательно занимая все пространство, находящееся между этими местами» [11].

---

[10] См. И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова. Изв. Николаевской морской акад., вып. IV. Пг., 1915, стр. 5. Изд. 3. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008.

[11] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 199.

Декарт решительно сужает понятие движения по сравнению со средневековьем. В средневековой литературе гениальная мысль древнегреческих философов о единстве всех процессов изменения в природе приобрела схоластический характер. Чтобы подняться до единой картины мира, в которой переходящее из одной формы в другую движение служит причиной всех явлений, необходимо было предварительно отделить наиболее простую форму движения, перемещение, от более сложных форм.

В приведенной выдержке из «Трактата о свете» мы встречаем очень важную мысль о *непрерывности* перемещения: «...тела переходят из одного места в другое, последовательно занимая все пространство, находящееся между этими местами». Когда мы говорим о перемещении как об исходном свойстве тел и противопоставляем его, например, аристотелевскому субстанциальному движению (возникновению и уничтожению), то мы предполагаем, что тело остается тождественным самому себе на всем протяжении своего пути. В первой характеристике перемещения как основы всех явлений природы уже указана та предпосылка механического естествознания, отказ от которой (или трактовка в качестве приближенного представления) в современной физике становится подлинным и радикальным отказом от механического взгляда на природу. Возможность такого отказа заставляет пристальней вглядываться в апории механической картины мира. Они приобретают достаточно явную форму уже в картезианской физике. Концепция движения у Декарта вытекает из отождествления пространства и вещества и связанной с таким отождествлением наиболее трудной апории механического мировоззрения в целом. Если тело обладает только протяженностью, то таким образом оно может быть индивидуализировано, где объективное различие в свойствах, которые характеризуют переход от тела к окружающим его другим телам? Чем данное тело отличается от окружающей среды? Декарт ответил на эти вопросы, объявив движение основой существования каждого тела. «Движение в подлинном смысле» — это движение относительно соприкасающихся тел, гарантирующее существование тела, его выделение из бесконечной однородной, тождественной с пространством материи [12]. Ядро ореха

[12] См. Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 477—478.

отличается от скорлупы и реально существует как таковое только в том случае, если оно смещается относительно скорлупы. Иначе границы тела исчезают.

Наряду с этим «подлинным смыслом» движения Декарт допускает некоторый иной смысл. Движение в «общепринятом смысле» — это движение, отнесенное к какому-либо телу отсчета, удаленному от данного тела и принятому за неподвижное. Корабль, увлекаемый течением реки, неподвижен в «подлинном смысле» и движется «в общепринятом смысле» относительно берегов. Движение «в общепринятом смысле» относительно: оно имеет определенную скорость по отношению к определенному телу отсчета. Можно переходить от одного тела отсчета к другому, складывая движение относительно некоторого тела отсчета с движением последнего. Что же касается движения «в подлинном смысле», то здесь мы можем считать неподвижными либо окружающие тела, либо данное тело. Со стороны индивидуализации тела такое равноправие двух систем вполне приемлемо. Для отделения тела от среды достаточно, чтобы существовала разница в скоростях тела и окружающей его среды, отнесенных к любому телу отсчета. Таким образом, скорость тела, отнесенная к окружающей среде, или, что то же самое, разница в скоростях среды и тела, является критерием существования тела. Материя, тождественная, согласно Декарту, пространству, отличается от пустого пространства, от пространства как такового наличием различных скоростей у различных частей материи или различных частей пространства, которое благодаря такому разделению приобретает физические черты.

В картезианской картине мира пространство благодаря движению приобретает физические черты, и геометрия в такой же мере «физикализируется», в какой физика геометризуется. Приписать частям пространства движение как основу их индивидуализации, как свойство, делящее пространство на части — материальные тела,— это значит не только свести вещество к пространству, но и поднять пространство до ранга вещества. В пространстве Декарта места́ — они же тела — находятся в движении, иногда, если скорости совпадают, они сливаются в одно тело, иногда разделяются на несколько частей, смещающихся одна относительно другой и поэтому обретающих индивидуальное физическое бытие.

Проблема индивидуализации тел, проблема разграничения части пространства, образующей тело, и окружающего пространства и картезианское решение этой проблемы — присвоение частям пространства различных скоростей — показывает весьма явственно, что геометризация физики означает создание физической геометрии. Мы увидим сейчас, что указанное решение проблемы индивидуализации вводит в картину мира понятие тождественности физического объекта самому себе и превращает пространство с чисто геометрическими соотношениями между геометрическими телами, фигурами, линиями и точками в мир движущихся физических тел с пространственно-временны́ми соотношениями между реальными событиями.

Геометризация физики и физикализация геометрии связаны с переходом от *конгруэнтности* геометрических фигур к *себетождественности* физических тел. Геометрическая фигура может оказаться тождественной другой фигуре при совмещении, что же касается физического тела, то оно может быть тождественно лишь самому себе.

Весь смысл картезианской физикализации пространства (чтобы избежать этого неологизма, можно сказать: генезиса физической геометрии) состоит в том, что Декарт приписывает частям пространства не конгруэнтность, гарантируемую совмещением, а физическое свойство непроницаемости, и в том, что он сводит непроницаемость к невозможности совместить пространственные объемы. В картезианской картине мира каждый объем пространства тождествен самому себе, не может быть совмещен с другим, и именно в этом состоит непроницаемость вещества.

Замена понятия конгруэнтности понятием себетождественности меняет природу геометрии. Понятие конгруэнтности соответствует геометрии как абстрактной теории, которая отвлекается от качественных свойств тел и рассматривает их идеализированные пространственные свойства. Но у Декарта физические тела не имеют никаких иных свойств, помимо пространственных. Для него геометрия — это наука не об абстрактно выделенных свойствах физических тел, а о самих телах. Такая точка зрения и была историческим прообразом физической геометрии.

Разграничение понятий движения позволило Декарту (в буквальном смысле «с грехом пополам») обойти церковный запрет коперниканства. В «Началах философии» он развивает следующие воззрения. С точки зрения истинно философской концепции движения Земля *неподвижна*, так как она не смещается относительно непосредственно окружающего ее эфира, вихрь которого увлекает Землю за собой. Вместе с этим эфиром Земля *обращается вокруг Солнца*. Отсюда следует, что система Коперника, где Земля движется вокруг Солнца, не противоречит церковному догмату о неподвижности Земли. С точки зрения истинного движения вообще нельзя говорить о взаимном движении небесных тел. Эту строгую концепцию движения Декарт жертвует на алтарь церковной догмы. Наоборот, движение планет в обычном смысле он трактует в соответствии с учением Коперника. Разумеется, догмат неподвижности Земли имел в виду абсолютную неподвижность, и Декарт обошел его чисто словесно. Он не скрывал этого обстоятельства от друзей. «Можно видеть,— писал он,— что устами я отрицаю движение Земли, а на деле держусь системы Коперника».

Конечно, не в этой нехитрой уловке смысл разграничения. Он связан с основными тезисами картезианской физики.

«Движение в обычном смысле» может относиться к различным телам отсчета. Мы можем переходить от одной системы отсчета к другой, складывая движение тел в данной системе с движением самой системы. Из этого следует возможность пользоваться при решении механических задач сложением и разложением движения. Декарт даже набрасывает некоторую иерархию системы отсчета:

«Хотя каждое тело имеет лишь одно свойственное ему движение, так как только известное число других тел соприкасается с ним и находится по отношению к нему в покое, однако оно может принимать участие в бесчисленных других движениях, поскольку оно составляет часть некоторых других тел, совершающих другие движения. Так, если мореплаватель, расхаживая по кораблю, носит в кармане часы, то колесики этих часов движутся так, как свойственно только им одним, но они, несомненно, причастны к движению расхаживающего мореплавателя, потому что составляют одну одновременно перемещающуюся с ним часть материи, несомненно, причастны они и к дру-

гому движению, поскольку относятся к плывущему по морю кораблю, а также и к третьему, а именно к движению моря, поскольку они следуют его течению, и, наконец, к четвертому, если предположить, что Земля вращается вокруг своей оси, так как с Землей они составляют одно тело. И хотя и справедливо, что в колесиках часов имеются все эти движения, однако ввиду затруднительности вычислить сразу столь многочисленные движения, а также ввиду того, что не все движения, которым могут быть причастны колесики, нам известны, для нас достаточно рассматривать в каждом теле только то движение, которое ему единственно свойственно и которое мы можем познать достоверным образом» [13].

Соответственно можно не только складывать различные движения, но и разлагать единое движение на его компоненты. Так, например, в колесах движущегося экипажа отдельные точки совершают и круговое движение вокруг оси и поступательное вместе с экипажем [14].

Подобное представление о движении годится для практических задач, но, по мнению Декарта, вовсе непригодно для философского анализа. Задача такого анализа у Декарта — обосновать индивидуальность тела. Для этого нужно однозначно решить вопросы, движется тело или не движется относительно остальной материи.

Если относить движение к различным предметам, в том числе к предметам отдаленным, то отсюда, говорит Декарт, вытекает полная условность и субъективность движения: о каждом предмете можно сказать, что он движется и не движется.

«Так, тот, кто сидит на корме корабля, подгоняемого ветром, воображает себя движущимся по отношению к берегам, если их считает неподвижными, но он думает противное, если смотрит на корабль, так как не изменяет своего положения по отношению к его частям» [15].

Как же достичь однозначного решения вопроса о движении тел? Истинное, однозначное, определенное движение — это переход из соседства с одними телами в соседство с другими. Однако такой переход отнюдь не является абсолютным движением в том смысле, в каком этот тер-

---

[13] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 481.
[14] См. там же, стр. 481—482.
[15] Там же, стр. 477.

мин применялся впоследствии. Мы должны рассматривать соседние тела как неподвижные только в отношении данного. Декарт говорит о взаимности движения двух систем, одна из которых связана с данным телом, а другая — с окружающими телами. Это было существенным поступательным шагом в историческом развитии учения об относительном движении. Декарт понимает под истинным движением относительное движение соприкасающихся тел и, таким образом, избавляется от полной неопределенности, связанной с отнесением движения к различным телам. Остается некоторая двойственная неоднозначность: с равным правом можно рассматривать в качестве движущегося и само тело и окружающий мир. Однако с этой оговоркой Декарт все-таки достиг своей задачи. Картина взаимного движения данного тела и окружающих тел оказывается однозначной.

Взаимность движения, эквивалентность двух систем, в одной из которых неподвижно данное тело, а в другой — неподвижно соприкасающееся с ним тело, позволяют Декарту объявить относительное смещение двух тел основой их различения. Далее Декарт хочет, говоря современным языком, ввести привилегированную систему отсчета. В пределах земной механики Землю нужно считать неподвижной потому, что в противном случае Земля окажется движущейся в различных направлениях. Предметы, движущиеся по поверхности Земли, не могут служить телом отсчета для самой Земли. По Земле, говорит Декарт, движутся в различных направлениях различные тела. Рассмотрим одно из них. Оно движется на запад. С таким же правом, казалось бы, мы можем сказать, что данное тело неподвижно, а Земля движется относительно него на восток. Однако мы должны отказаться от такого представления, если взглянем на другой участок Земли, где движется другое тело в направлении, противоположном движению первого тела, иначе говоря, на восток. Если мы представим себе это другое тело неподвижным, то по отношению к нему Земля движется в противоположную сторону, т. е. на запад. Получается, что с точки зрения относительности движения множество направленных в различные стороны движений различных тел на земной поверхности эквивалентно движению Земли одновременно в различные стороны. Поэтому Декарт заявляет, что не следует говорить о движении Земли относительно находя-

щихся на ней предметов, а нужно рассматривать Землю как неподвижное тело отсчета [16].

Перейдем к вопросу об инерции в физике Декарта. Взаимное смещение тел имеет универсальный характер. Можно при переходе к некоему телу отсчета представить покоящимся данное тело, но ни в одной системе отсчета не могут оказаться неподвижными прилегающие друг к другу данное тело и соприкасающиеся с ним тела, иначе данное тело потеряло бы свое индивидуальное бытие. Вопрос о причине может ставиться по отношению к изменению состояния, но не по отношению к его сохранению. Перечисляя законы движения — «три главнейших правила, по которым бог заставляет действовать природу этого нового мира», Декарт пишет: «Первое правило заключается в следующем: каждая частица материи в отдельности продолжает находиться в одном и том же состоянии до тех пор, пока столкновение с другими частицами не вынуждает ее изменить это состояние. Иными словами, если эта частица имеет некоторую величину, она никогда не станет меньшей, пока ее не разделят другие частицы; если частица круглая или четырехугольная, она никогда не изменит этой фигуры, не будучи вынуждена к тому другими; если она остановилась на каком-нибудь месте, она никогда не двинется отсюда, пока другие ее не вытолкнут, и раз уж она начала двигаться, то будет продолжать это движение постоянно с равной силой до тех пор, пока другие ее не остановят или не замедлят ее движения» [17].

Таким образом, инерция порвала связь с идеей гармоничного миропорядка и стала характеристикой тела, не подвергающегося воздействию извне. Ни о каком центральном теле, вокруг которого происходит инерционное движение, уже нельзя было говорить. Вращения в системе Декарта — это вихри, природа которых отнюдь не инерционная. Мало того, поскольку воздействия на тело включают его в вихревое движение по кругу, тело, предоставленное самому себе, будет двигаться без искривления, прямолинейно. Итак, с точки зрения Декарта, движение по инерции — это отрицательное понятие, означающее, что тело, не испытывая воздействия со стороны других

---

[16] См. Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 480.
[17] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 198.

тел, не включится в вихревой круг и сохранит свое состояние прямолинейного движения или покоя. Отсюда, по мнению Декарта, следует, что инерционное движение не требует механического объяснения. Такого объяснения требует изменение скорости.

«Предположив только что сказанное, мы избежим затруднения, в которое впадают ученые, когда хотят найти основание того, что камень продолжает некоторое время двигаться, не находясь уже более в руке того, кто его бросил. В этом случае скорее следует спросить, почему он не продолжает двигаться постоянно» [18].

Механическое объяснение природы у Декарта имеет своим предметом не отрицательный случай инерции, а положительный случай — взаимодействие тел, искривляющее их прямолинейные инерционные пути либо заставляющее тела двигаться с ускорением. Если реальные движения криволинейны, то нереализованное движение по прямой проявляется лишь в центробежной силе. В этом случае инерционное движение совпадает с реальным лишь в точке. Тело движется по кривой под влиянием других тел, но в каждой точке оно стремится двигаться по касательной. Движение по инерции Декарт связывает с понятием движения в данный момент, иначе говоря, скорости в данной точке.

«...Хотя при движении тела его путь чаще всего представляется в форме кривой линии и что хотя невозможно произвести, как это было сказано, ни одного движения, которое не было бы в каком-либо виде круговым, тем не менее каждая из частиц тела по отдельности всегда стремится продолжать его по прямой линии. И таким образом их действие, то есть склонность, которую они имеют к движению, отличается от их движения» [19].

Мы видим, что, по Декарту, центробежная сила есть частный случай инерции. Сформулировав принцип прямолинейности инерционного движения, Декарт пришел к представлению о стремлении криволинейно движущегося тела двигаться по касательной.

Из понятия о прямолинейном инерционном движении Декарт выводит принцип наибольшей простоты прямой линии.

---

[18] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 200.
[19] Там же, стр. 202.

«Из всех движений только одно движение по прямой совершенно просто. Его природа может быть понята сразу, ибо для этого достаточно предположить, что какое-нибудь тело находится в состоянии движения в определенную сторону, что бывает в каждый из моментов, которые могут быть определены в течение того времени, когда оно движется. Для того чтобы представить круговое или какое-нибудь другое возможное движение, необходимо вместо этого рассмотреть по крайней мере два таких момента, или лучше две из его частей, и отношение, существующее между ними» [20].

У Галилея наиболее простым, естественным и совершенным было еще криволинейное движение. У Декарта простейшее движение — прямолинейное, но природа оперирует сложными криволинейными или ускоренными движениями. Прямолинейное и равномерное инерционное движение стало у Декарта компонентой сложного реального движения. Последнее может быть криволинейным движением планеты, криволинейным полетом брошенного тела, но может также быть ускоренным прямолинейным падением тела. Во всех трех случаях движение по инерции служит неизменной компонентой результирующего движения. *Вторая компонента — это* движение падающего тела под действием тяжести. Ньютон впоследствии отождествил с тяжестью причину ускорения планет. Декарт не дошел до такой идеи, но создал предпосылку ее строгого доказательства, установив понятие инерционного движения как прямолинейной компоненты ускоренного движения.

Декарт отказался от представления о пустоте, и поэтому закон инерции потерял свою наглядную форму. Уже нельзя представить себе в виде реального эксперимента движение тела в отсутствие действующей на него среды. Декарт говорит о телах, движущихся с ускорением, и инерция фигурирует в качестве одной из компонент реального движения.

Это понятие было исходным пунктом теории центробежных сил, созданной Гюйгенсом. В теории Гюйгенса из прямолинейного характера инерционного движения выводится существование центробежной силы, пропорциональной квадрату скорости движения и обратно пропорцио-

[20] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 202—203.

нальной радиусу круга. Таким образом, картезианская идея прямолинейного инерционного движения была существенным этапом в развитии науки, из нее были сделаны фундаментальные выводы уже младшими современниками Декарта.

Первостепенное значение имела и другая сторона картезианской теории движения — принцип его неуничтожаемости. Декарт утверждал, что количество движения во Вселенной не может измениться. Доказательство этого тезиса теологическое. Также теологична форма закона инерции. Из совершенства и неизменности бога вытекает постоянство всех сил, которым подчинена природа. Каждое тело остается в том же состоянии покоя или движения, пока внешняя причина не изменит его. Из этого закона вытекает, что предоставленное самому себе движущееся тело сохраняет не только скорость, но и направление своего движения. Движение по кривой непрерывно изменяет свое направление. Неизменное направление — прямая. Поэтому движущееся тело сохраняет прямолинейное направление.

Что скрывается под теологической формой законов движения?

Прежде всего, отождествление инерционного движения с неизменным состоянием. Декарт приравнивает движение (и его частный случай — покой) к состоянию и из неизменности состояния выводит сохранение движения по инерции. Тело сохраняет свое состояние, поэтому если оно движется беспрепятственно, то движение не может прекратиться, а если оно встречает какое-либо сопротивление, то движение не может ни уничтожиться, ни возникнуть, оно переходит от одного тела к другому.

В «Трактате о свете» Декарт следующим образом формулирует связь между неизменностью состояния и непрерывным движением во Вселенной: «...и только из того, что бог продолжает сохранять материю в неизменном виде, с необходимостью следует, что должны происходить известные изменения в ее частях» [21]. Мы сталкиваемся с логическим приемом, при помощи которого Декарт создает возможность обходиться без теологических мотивов в собственно физических построениях. Область бога — неизменное. Область физики — изменения состояний, вызван-

[21] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 197.

ные определенными причинами. «Эти изменения, — пишет он далее, — как мне кажется, нельзя приписать непосредственно действию бога, поскольку он совершенно неизменен. Поэтому я приписываю их природе. Правила, по которым совершаются эти изменения, я называю законами природы» [22].

Таким образом, развивающаяся движущаяся природа выводится Декартом из неизменности действий бога, но изменениями управляют законы природы. Закон сохранения перестает быть чисто отрицательной констатацией неизменности количества движения, а превращается в картину положительных переходов движения от одного тела к другому, где движение одного тела оказывается причиной ускорения другого. В своей *положительной* трактовке законы природы теряют связь с теологическим обоснованием. Как только создан инерционный мир, где прямолинейное и равномерное движение сохраняет неизменную скорость — знак своего божественного происхождения, как только это произошло, начинается царство каузальных законов природы, управляющих взаимодействием движущихся тел. Здесь уже нет места для бога, нет места метафизическим обоснованиям и нет места чисто инерционным движениям. В реальном мире движение происходит по криволинейным вихревым направлениям, причем эти криволинейные направления отнюдь не инерционные, как у Галилея, а, напротив, вызваны универсальным взаимодействием различных элементов всезаполняющей материи. Грань между метафизикой и физикой Декарта отделяет инерционное движение от ускоренного.

В качестве конкретной иллюстрации своих законов движения Декарт разрабатывал теорию удара, которая, впрочем, включала произвольные утверждения.

Создание теории удара имело большое значение для кинетической физики. Если полностью отказаться от дальнодействия и при этом сводить научное исследование к поискам механических моделей, то удар оказывается причиной движения тел и, следовательно, научное объяснение должно сводить причины каждого явления к удару. Сведение всех физических процессов к удару действительно было идеалом механического объяснения природы. В своей «Истории естествознания» Кювье говорил, что удар слу-

[22] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 197.

жит единственным научно постигаемым образом причинности. Пока все явления не объяснены при помощи ударов твердых тел, физическая теория далека от завершения. «Раз удалившись от явления удара, мы не имеем более ясной идеи об отношениях между причиной и действием. Все приводится к тому, чтобы собирать частные факты и искать общие положения, которые обнимали бы наибольшее их число. В этом состоят все физические теории, и до какой широты ни довели бы мы каждую из них, им недостает еще многого, если они не сведены к законам удара, которые одни могут преобразовать их в настоящие объяснения явлений».

В теории удара закон инерции приобретает новый смысл. Движение тела рассматривается как причина, вызывающая ускорение другого тела, следовательно, уже не с чисто кинематической стороны. Соответственно инерция фигурирует не только как отрицательное определение, но и как положительное. Здесь уже нельзя сводить закон инерции к отрицательному утверждению, что тело сохранит свое состояние (покой или равномерное и прямолинейное движение), пока оно не встретит внешнего воздействия. Напротив, тело сохранит свою скорость и в этом случае, и новое движение прибавится (алгебраически) к инерционному. Если тело, получив некоторый импульс, движется затем по инерции в сопротивляющейся среде, то к его неизменной скорости прибавляется другая, направленная в обратную сторону. Напротив, тело, движущееся по инерции в поле тяготения, направленном по его движению (например, тело, брошенное вниз на землю), сохраняет скорость, приобретенную в результате первоначального импульса, к которому непрерывно присоединяются новые импульсы, также навсегда запечатлевающиеся в движении тела.

Нужно отметить, что у Декарта соударение тел не превращает прямолинейное движение в криволинейное, оно лишь меняет одно направление прямолинейного движения на другое. Но большое число взаимодействий всегда дает замкнутую траекторию, образует вихрь, так как тело может двигаться в заполненном пространстве только в том случае, когда находящееся впереди второе тело уступает ему дорогу, толкнув третье, и т. д., пока последнее из захваченных вихрем тел не займет место (разумеется, внешнее) первого тела.

Концепция вихрей связана с представлением об абсолютной упругости тел, к соударениям которых сводятся существующие в природе взаимодействия.

Теория удара, выдвинутая Декартом, целиком относится к совершенно твердым телам. Декарт не знал — это и было причиной ошибочности теории — строгого разграничения упругих и неупругих тел. Все дело в геометризации физики, в представлении о форме и размерах тела как о свойствах, сохраняющихся при движении, гарантирующих тождественность тела самому себе, и в представлении о движении как основе действительного физического существования объема и формы.

### 3. Учение о веществе

У Декарта геометрическая по своему характеру теория материи должна сводить все свойства веществ к пространственным конфигурациям различно движущихся частиц бескачественной субстанции. Эти частицы — отнюдь не постоянные атомы. С точки зрения Декарта, частицей можно назвать любую дискретную часть материи, которая пребывает в движении относительно окружающих тел. Однако для учения о массе, агрегатных состояниях, теплоте и для космогонии Декарту необходимо было представление о некоторых сравнительно постоянных типах частиц. Декарт назвал их элементами. В «Трактате о свете» он говорит о трех элементах: первый — элемент огня, второй — элемент неба, третий — элемент Земли. Первый элемент состоит из частиц, которые вообще не имеют постоянной формы и могут дробиться и менять форму в той мере, в какой это необходимо, чтобы заполнить любые самые тонкие промежутки между частицами других элементов. Частицы второго элемента обладают постоянной, шарообразной формой и поэтому не могут прижаться друг к другу так, чтобы при этом не оказалось промежутков. Промежутки заполняются частицами первого элемента. Поэтому второй элемент никогда не может существовать в чистом виде без первого элемента. Третий элемент — это элемент Земли. Частицы этого элемента велики и движутся со сравнительно ничтожной скоростью.

В обычном пламени мы никогда не можем встретить первый элемент в чистом виде. Соответственно и реальный «грубый» воздух отнюдь не сводится к элементу воз-

духа, т. е. ко второму элементу. Несмотря на это, каждый элемент имеет во Вселенной определенное место, где может сохраниться в естественной чистоте. Поэтому с течением времени элементы дифференцируются. В этом состоит необратимость, направленность мирового процесса.

Эта теория элементов, изложенная в «Трактате о свете», в основном повторяется и в «Началах философии». Однако в работах, написанных между «Трактатом» и «Началами», Декарт несколько иначе излагал учение об элементах. В письмах, относящихся к периоду, предшествовавшему первому изданию «Рассуждения о методе», и в трактатах, которые были приложены к этой работе, Декарт говорил лишь о двух элементах. Под первым элементом здесь подразумевается передающая свет среда, состоящая из частиц круглой формы. При этом Декарт вовсе не упоминал о том элементе, который в «Трактате о свете» фигурировал в качестве первого, — о тончайшей материи, состоящей из частиц, лишенных постоянной формы. Этого элемента нет ни в «Метеорах», ни в «Диоптрике», ни в других работах Декарта, предшествовавших «Началам философии». Однако эта тончайшая материя, состоящая из частиц неопределенной формы, была необходима для защиты основного тезиса картезианской физики. Декарту возражали, что между шарообразными частицами тонкой материи остаются пустые промежутки. В переписке, касаясь этих возражений, Декарт ограничивался неопределенным указанием на возможность некоего, еще более тонкого элемента.

Таким образом, идея тончайшей жидкости, состоящей из частиц неопределенной формы, требовалась при изложении картины мира в целом, чтобы в этой картине не оказалось пустого пространства. Поэтому Декарт хотел изложить ее в философском трактате, охватывавшем мироздание в целом.

Первый элемент «Трактата о свете», т. е. тончайшая материя, состоящая из частиц неопределенной формы, был нужен Декарту для обоснования его космогонической картины. В «Трактате о свете» Декарт исходил из первоначального хаоса. Частицы вещества были самыми разнообразными. Однако, как он показывает, это различие неизбежно должно было смениться дифференциацией частиц на три элемента. В «Началах философии» Декарт исходит

из первичных единообразных частиц и получает в конце концов те же три элемента. Он предполагает, что первоначально вся материя не состояла из шарообразных частиц, так как шары не могут заполнить непрерывно все пространство. Однако с течением времени большое число частиц благодаря обтачиванию превратилось в шары. Промежутки между шарообразными частицами заполнились осколками материи. Чем меньше эти осколки, тем скорее они движутся и тем скорее дробятся на еще меньшие доли. Последнее обстоятельство связано со сравнительно большой поверхностью малых частиц. В то время как объем частиц уменьшается пропорционально кубам, поверхность уменьшается пропорционально квадратам. Поэтому по мере дальнейшего уменьшения поверхность становится все большей по сравнению с объемом. Воздействие окружающей материи на частицу пропорционально ее поверхности. Поэтому это воздействие растет с уменьшением частиц, и соответственно растут дробящие ее силы. Таким образом, возникают два первых элемента мира. Первый элемент — это материя, которая благодаря быстроте своего движения дробится на очень малые части и заполняет самые тесные промежутки между частицами второго элемента. Второй элемент состоит из шарообразных частиц. Третий элемент образуется позднее. Он состоит из частиц большей плотности или такой формы, которая препятствует их движению. Из этих трех элементов состоит Вселенная.

Теперь можно вернуться к картезианскому представлению о массе. Из отождествления пространства и материи вытекает, что не масса, а лишь объем служит мерой количества вещества. Декарт писал, что «когда сосуд, например, наполнен золотом или свинцом, он не заключает в себе больше материи, чем тогда, когда мы представляем его пустым».

Однако Декарт видел, что для механики важен вес тела. Поэтому он утверждал, что для движения существенно не общее количество материи в теле, т. е. его объем, а количество весомого третьего элемента. Это количество соответствует в общем позднейшему понятию массы. Декарт не считал массу общим свойством материальных тел, и это коренное отличие картезианской механики от позднейшей механики XVII—XVIII вв. имеет первостепенное историческое значение. Понимая под инерцией и непрони-

цаемостью чисто геометрические свойства пространства — материи, Декарт не мог приписать всем телам (и макроскопическим и частицам) единые механические свойства, отличающие эти тела от пустого пространства. Это было сделано в атомистических системах XVIII в.

Если масса пропорциональна не количеству материи, а лишь количеству третьего элемента, то вес, в свою очередь, непропорционален и этой последней величине. Таким образом, Декарт отрицал неразрывную связь между веществом и его тяжестью. Когда Декарт отнимает у тела один признак за другим, чтобы оставить лишь протяженность, он в числе прочих качеств отнимает и вес, причем ссылается на существование невесомых тел. «Отбросим, далее, тяжесть, — говорил Декарт о теле, — потому что хотя огонь исключительно легок, тем не менее и он считается телом» [23]. Из контекста видно, что огонь рассматривается здесь в качестве невесомого вещества.

Таково представление Декарта о мерах материи, массы и веса, вытекающее из теории элементов. Посмотрим далее, как из этой теории выводится различие агрегатных состояний и учение о теплоте.

Для Декарта существует лишь одно различие между агрегатным состоянием тел: тела могут быть твердыми либо жидкими. С точки зрения картезианского учения о веществе газы не могут отличаться от жидкости. В твердых телах частицы неподвижны, в жидких они находятся в непрерывном движении. Если соседние частицы неподвижны, то отделение их друг от друга требует затраты определенных сил. Для Декарта конфигурация, подобно движению, входит в понятие состояния и, следовательно, так же инертна, как движение. «...Расположившись однажды определенным образом, частицы сами по себе не меняют больше своего положения» [24]. Поэтому отделение покоящихся частиц требует значительной силы, откуда у Декарта и вытекает неразрушимость твердых тел. Напротив, движущиеся частицы не оказывают такого сопротивления при отделении их друг от друга.

Таким образом, по Декарту, между твердыми и жидкими телами существует лишь та разница, что части твердых тел неподвижны (в картезианском смысле, т. е. относи-

---

[23] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 470.
[24] Там же, стр. 179—180.

тельно друг друга) и неотделимы без некоторого усилия, а части жидких тел находятся в непрерывном движении и легко отделяются друг от друга. Поэтому в соответствии с различной скоростью движения существует постепенный переход от совершенно твердых тел, где частицы вовсе не движутся, до наиболее жидких, где их скорость чрезвычайно велика.

Отсюда вытекает картезианская теория воздействия теплоты на строение вещества. Пламя — это жидкость с особенно быстрым движением частиц. Поэтому пламя воздействует на другие тела, приводя в движение частицы этих тел, превращает их в жидкость. Природа плавления и природа сжигания одна и та же. В металлах частицы, по мнению Декарта, одинаковы, и поэтому пламя, приводя в движение одни частицы, вызывает движение и других частиц, и металл превращается в жидкость и плавится. Напротив, частицы дерева и других горючих тел отличаются друг от друга, и поэтому пламя, оставляя неподвижными наиболее крупные частицы, превращает в жидкость другие, мелкие, которые отделяются от крупных и уходят в виде дыма.

Воздух — также жидкое тело, хотя и менее жидкое, чем пламя. Декарт описывает пылинки, которые становятся видимыми в солнечном луче (он называет их «атомы» — atomes — и утверждает, что колебания этих пылинок доказывают непрерывное движение частиц воздуха). Воздух и жидкости также оказывают разрушающее влияние на соприкасающиеся с ними тела, но это влияние гораздо меньше, чем влияние огня, так как движение частиц здесь несравненно медленнее и оно не может превратить другие тела в жидкость.

В «Трактате о свете» воздух рассматривается как собрание по преимуществу частиц второго элемента. В «Метеорах» Декарт пишет о водяном паре и предполагает, что последний состоит из частиц воды, испытывающих очень быстрое вращательное движение. В «Началах философии» подобным образом рассматриваются вообще все газы, которые в те времена объединялись понятием воздуха. В IV части «Начал» воздух рассматривается как совокупность частиц третьего элемента, тонких и разделенных между собой и благодаря этому воспринимающих импульсы со стороны второго элемента, который проникает между этими частицами. Каждая частица вращается в особом

сферическом пространстве, в котором нет других частиц третьего элемента.

Температура газов, по Декарту, соответствует скорости движения частиц. Эта концепция, несколько приближающаяся к современным представлениям, оказала существенное влияние на воззрения ряда мыслителей XVII—XVIII вв.

Отождествление вещества с пространством приводило Декарта к резко отрицательной оценке представления о неделимых частицах. Он выступал против атомистики в защиту бесконечной дробимости вещества, сводившейся к геометрическому делению.

Из представлений о веществе вытекают принципы космогонии Декарта. Декарт выводит частные и конкретные законы природы из наиболее общих законов движения. От общих законов движения он переходит к более сложным законам взаимодействия тел при ударе, к молекулярным процессам, к дифференцированным типам частиц, движение которых объясняет космогонические, физические, химические и физиологические явления. Но это не только *логический* ряд. Декарт берет ряд постепенно усложняющихся категорий, какие до него в первоначальной, неразвитой форме встречались у Галилея, а после него были высказаны Ньютоном в виде однозначной и строгой цепи заключений. Ньютон переходит от закона всемирного тяготения к более конкретным динамическим задачам. Декарт также идет от общих принципов к частным, но для него и те и другие воплощены в кинетических наглядных моделях. Тем самым вместо логического вывода «одновременных» уравнений у Декарта фигурирует историческое изложение сменяющих друг друга кинетических картин, связанных между собой как причина со следствием. В этом методологическая основа трансформистских идей Декарта.

В «Рассуждении о методе» Декарт пишет о телах: «Природу их гораздо легче познать, видя их постепенное возникновение, чем рассматривая их как совершенно готовые» [25].

Можно подумать, что трансформизм Декарта — это дидактический прием, благодаря которому природа вещей «становится более доступной пониманию». Декарт именно

[25] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 292.

так и представляет дело. В «Началах философии» он еще яснее, чем в только что приведенном отрывке, показывает связь трансформистской точки зрения с причинным объяснением мира, но опять оговаривает условный дидактический характер причинного представления о природе.

Однако все оговорки об условности причинно-трансформистского изучения явлений теряют свою убедительность, как только мы вспомним, что, с точки зрения Декарта, природа объективного мира и логика его познания не могут противоречить друг другу. Исходные звенья логического анализа совпадают с исходными причинами, которыми объясняется действительность. Наука должна отыскивать причины и выводить из них следствия. Следовательно, метод науки заключается в том, чтобы генетически исследовать явления, изучать причины и следствия в том порядке, в каком они следовали друг за другом в действительности, исторически.

Какова же цепь механических причин и следствий, образующая картину развития природы? Основные понятия картезианской космогонии — вихри движущейся материи. Из тождества материи и пространства, из абсолютной заполненности последнего следует, что всякое движение может происходить лишь по кругу. Пустого пространства нет, и поэтому перемещение одного тела вызывает перемещение другого. Другое, в свою очередь, заставляет двигаться находящиеся перед ним тела, пока последнее тело в этом ряду не заступит места, покинутого первым. Последнее звено этой цепи должно соединиться с первым. Поэтому в действительности движение происходит лишь по кругу.

Декарт замечает далее, что вовсе не требуется абсолютная правильность кругов. Кольца движущейся материи могут иметь неправильную форму, они могут сужаться, и все геометрические неравенства площадей поперечных сечений компенсируются неравенством в скоростях, иными словами, в наиболее узких местах круга движущейся материи движение происходит с большей скоростью.

Одним из доказательств кругового характера движения служит следующее наблюдение. Если в плотно закрытом сосуде, например в бочке с вином, сделать отверстие внизу, жидкость не вытекает из сосуда. Традиционное объяснение ссылается на боязнь пустоты; но Декарт отвергает подобное объяснение. «Хорошо известно, что вино это не

имеет никакой души и не может чего-нибудь бояться, да если бы оно и имело ее, я не представляю себе, каким образом оно могло бы узнать об этой пустоте, являющейся на самом деле лишь химерой» [26].

Более правильно, по мнению Декарта, другое объяснение: вино не выливается из бочки потому, что бочка закрыта и круговое движение не может осуществиться. Частицы воздуха, которые должны освободить место вытекающему вину, не могут найти места во Вселенной, так как Вселенная заполнена, а частицы, которые должны были войти в бочку вместо вытекающего вина, не могут этого сделать, так как в бочке нет других отверстий.

Учение о вихрях подробно изложено в «Трактате о свете» (главы VIII—X) и в III части «Начал философии». Вихри стали основным понятием, универсальной моделью всего картезианского естествознания. Они, прежде всего, объясняют неизбежное возникновение Вселенной со звездами, Солнцем и планетами из любого первоначального состояния материи. В каком бы состоянии ни находилась первоначально Вселенная, в ней, по мнению Декарта, должен с течением времени образоваться круговой вихрь. В мире нет пустоты, и поэтому все частицы вещества вынуждены двигаться по кругу. Они стремятся двигаться в разных направлениях, и поэтому нельзя представить себе согласованное движение всей Вселенной вокруг единого центра. Напротив, из любого, совершенно неупорядоченного движения частицы Вселенной образуют круговые вихри вокруг многих центров. В областях, близких к центрам вращения, собираются наименее подвижные и наименьшие по величине частицы.

Вместе с сосредоточением частиц вещества вокруг центра вращения происходит их сортировка: на равных расстояниях от центров собираются однородные частицы.

Небольшие частицы первого элемента воспринимают движение от более крупных частиц второго элемента, но сами не могут передать им свою энергию в той же пропорции. В первом элементе всегда сохраняется запас движения, и частицы первого элемента находятся в непрерывном движении. Отсюда, если пользоваться современным языком, следует, что переход энергии необратим. Движение переходит от частиц второго элемента к частицам первого,

[26] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 185.

и, по-видимому, с течением времени запас движения в первом элементе должен возрастать.

Мелких и быстрых частиц и осколков с течением времени становится все больше, так как шарообразные частицы второго элемента продолжают обтачивать свои края и после того, как во Вселенной оказалось достаточно осколков для заполнения промежутков между шарообразными частицами. Избыток первого элемента сосредоточился в некоторых центрах, где создались жидкие шарообразные тела. В одном из таких центров образовалось Солнце, в других центрах — другие неподвижные звезды.

Кроме первого и второго элементов, во Вселенной существуют частицы третьего, малоподвижного элемента. Из них образуются планеты. Стремясь к центру заключающего их неба, они не достигают этого центра, так как последний занят Солнцем или в других небесах — неподвижной звездой. Планеты оказываются на некотором расстоянии от центра, которое соответствует равновесию между силой движения частиц, входящих в состав планеты, и силой движения окружающей небесной жидкости. Таким образом, получаются определенные орбиты различных планет.

Попав на свое место, планеты движутся вместе с окружающей их материей неба. Однако, говорит Декарт, между движением небесной материи и движением планет существует некоторое различие, которое в конце концов приводит к вращению планет вокруг своей оси. Частицы неба благодаря неравенству в скорости догоняют планету, ударяются о нее и отклоняются, причем не по направлению к центру вихря, а, напротив, к его периферии. Образуется поток небесной жидкости, омывающий планету с внешней стороны вихря. Этот поток заставляет планету вращаться не только вокруг Солнца, но и вокруг себя.

От истории солнечной системы Декарт переходит к истории Земли. Первоначально Земля состояла из первого элемента, подобно Солнцу и неподвижным планетам. Она была маленьким Солнцем и имела вокруг себя свой вихрь. Впоследствии частицы с гранями (вещество, заполняющее пространство между тремя соприкасающимися шарами второго элемента) и некоторые другие частицы первого элемента превратились в материю третьего элемента. На поверхности Земли появились участки, не излучающие свет, темные пятна, подобные темным пятнам Солнца.

Постепенно вся Земля была покрыта и затемнена пятнами третьего элемента — участками твердой коры. После того как движение частиц, составляющих Землю, замедлилось, сила вихря, в центре которого находится Земля, ослабела. Еще до этого вихрь Земли поглотил меньший по размерам вихрь Луны, и Луна стала спутником Земли. Теперь аналогичная судьба постигла и Землю. Вихрь Земли был поглощен вихрем Солнца, и Земля стала частью более мощной вихревой системы. Впрочем, Земля сохранила и самостоятельный вихрь, гораздо более слабый, но достаточный, чтобы увлекать Луну и служить источником земного тяготения.

Строение Земли — результат описанной эволюции. В центре Земли поныне находятся быстро движущиеся частицы первого элемента. Это раскаленное ядро Земли подобно веществу Солнца. Оно окружено твердым веществом, которое, в свою очередь, облекается третьим слоем, содержащим металлы и другие составные части земной коры. Указанные три слоя образовались еще в те времена, когда Земля не была поглощена вихрем Солнца. Наружные слои Земли созданы после указанного поглощения. В их строении мы видим результаты освещения Земли лучами Солнца. Первоначально Земля покрылась слоем воды. Затем сверху над водой образовалась твердая кора, эта кора до сих пор служит оболочкой Земли. Потоки первого и второго элементов под влиянием Солнца пробили в этой коре трещины, и она в некоторых местах погрузилась в воду, вытеснив ее на поверхность. Так образовались моря. Некоторая часть земной коры, опустившись, не погрузилась в воду и образовала низменности. Кое-где земная кора поднялась — ее части, упираясь одна в другую, образовали горные хребты.

Мы видим, что космогония Декарта основана на произвольных допущениях. Но столь же очевидно, что именно последовательно кинетический характер физики Декарта привел к идее происхождения Вселенной.

## 4. Эфир

Элементы вещества, различающиеся по своей структуре и движениям, позволяют Декарту построить систему мира и описать его эволюцию. Мысль Декарта при этом прикована к основной проблеме мироздания и бьется над

основной апорией механического представления о природе. Основная проблема: в чем состоит тот пребывающий, неизменный предикат, который позволяет идентифицировать тело при изменении его положения в пространстве, придает физический смысл понятию положения в пространстве и отличает тело от пространства? Декарт отказывается от качественного отличия, которое отделяло тело от окружающей среды у Аристотеля, и отказывается от различия реального бытия и реального небытия, которое выделяло атомы из окружающего пространства у Демокрита. У Аристотеля пространство, заполненное качественно отличной от движущихся тел континуальной средой, было физически неоднородным, и это позволяло придавать наглядный физический (кинематический!) смысл понятиям пространственного положения тела и его пространственного («местного») движения. Но у Декарта пространство однородно и так же однородно тождественное пространству вещество. В динамических концепциях XVII в. отличие тела от окружающего, нетождественного веществу пустого пространства видели в инертной массе как исходном, не сводимом к кинематическим определениям свойстве тел. Что же мог выдвинуть Декарт в качестве предиката, гарантирующего индивидуальность тела? Только одно — его *движение, отличающееся по скорости от окружающей среды* и совпадающее по скорости у всех частей тела. В этом случае среда становится совокупностью тел, движущихся различным образом и группирующихся по некоторым общим геометрическим свойствам, по форме и величине, которые имеют только один смысл: в объеме данной формы и величины движение всех частей происходит с одной и той же скоростью. Декарт должен ответить на два вопроса: «что такое тело, чем оно отличается от окружающего пространства» и «как движется данное тело». Оно отвечает на второй вопрос и полагает, что *тем самым* дан ответ и на первый вопрос.

В сущности для этого существует только одно основание: части пространства не обладают конгруэнтностью, они непроницаемы, и поэтому нельзя говорить о последовательном совмещении тела с различными местами, различными частями пространства. В известной мере Декарт предвосхищает динамический критерий индивидуализации тела, состоящий в его сопротивлении импульсу. Но сейчас речь идет не о динамическом эффекте, а только о про-

странстве, части которого лишены свойства конгруэнтности.

Отсюда следует, что динамические взаимодействия тел состоят в толчках, которые передаются посредством промежуточных тел. Последние по своей форме и величине могут быть непосредственно не наблюдаемы. Смещения промежуточных тел объясняют не только динамические взаимодействия, но также звук, теплоту и процессы, которые протекают в окружающей тела среде, в том числе распространение света.

Здесь исходный пункт картезианской по своим истокам идеи, вошедшей в науку надолго, на три столетия. Это идея *эфира*.

Теория эфира, особенно многим обязанная Гюйгенсу, была разработана им в Голландии, там же, где работал Декарт. Здесь, в Голландии, Декарту удалось без особых помех разработать свою философскую систему. Анафемы голландских богословов нельзя сравнить с деятельностью инквизиции, а участь Спинозы — с судьбой Джордано Бруно. Такие условия объясняются не протестантской религией самой по себе — протестанты сжигали ученых не хуже католиков,— а сравнительно высоким уровнем экономического развития и в особенности экономическими и политическими результатами борьбы за независимость. Здесь работали Декарт, Бейль, Локк, Толанд и Спиноза — уроженцы разных стран, искавшие относительной свободы научного творчества. В Голландии были изобретены зрительная труба и микроскоп. Вершиной теоретического, экспериментального и прикладного естествознания были работы Гюйгенса — математика, давшего одно из первых изложений теории вероятностей, астронома, открывшего спутников и кольцо Сатурна, изобретателя часов с маятником и пороховой машины и, что самое главное, творца волновой теории света и учения об эфире.

В науке XIX в. основное значение принадлежало идее эфира как среды, передающей свет. Но если подойти к теории эфира с исторической точки зрения, если вспомнить об идеях, оставленных естествознанием на его пути, не нашедших в свое время непосредственного подтверждения, оказавших лишь косвенное влияние на развитие науки, то значительный исторический интерес вызывает ряд теорий тяготения, основанных на представлении об эфире. Они были заслонены ньютоновской механикой, и на первый

план выдвинулась оптическая функция эфира, которую ньютоновская оптика закрыла лишь ненадолго. Но в сущности даже в годы наибольшего триумфа ньютонианства в сознании ученых таилась надежда найти какую-то кинетическую причину тяготения.

Остановимся на теории тяготения Декарта. Прежде всего следует заметить, что Декарт был одним из многочисленных предшественников Ньютона, говоривших о зависимости между тяжестью и расстоянием. В письме к Мерсенну, датированном июлем 1638 г., Декарт описал опыт, который мог бы доказать зависимость тяжести от расстояния между тяжелым телом и центром Земли. Нужно поставить весы на высокой башне, у подножия которой находится глубокий колодец, и определить вес груза, подвешенного к чашке весом на длинной нити, опущенной с вершины башни в колодец. Затем тот же груз и нить следует взвесить, положив их на чашку весов. «Но вследствие того, что расстояние от глубины колодца до вершины башни очень мало сравнительно с диаметром Земли, и по другим также соображениям, которые опускаю, опыт этот мог бы служить для сказанной цели лишь в том случае, если бы разность в весе тела на разных высотах была очень значительна».

Поэтому Декарт склонен ограничиться абстрактными доказательствами зависимости тяжести от расстояния до центра Земли. В том же письме он говорил о Луне, Венере, Меркурии и других планетах, состоящих, по-видимому, из тех же веществ, что и Земля. Эти планеты должны были упасть на Землю, если бы значительное расстояние не уничтожало их тяжесть. Далее идут ссылки на птиц, которые летают далеко от Земли с большей якобы легкостью, чем вблизи ее поверхности, на бумажный змей, теряющий часть своего веса при подъеме, и на опыты с ядром, пущенным по направлению к зениту, и будто бы никогда не возвращающемся назад. Об этом опыте Мерсенн сообщил Декарту. Декарт ответил, что опыт нужно сделать не с ружьем, а с большой пушкой и железным ядром, чтобы ядро не расплавилось и могло быть потом легко найдено. Декарт даже приложил к письму чертежи установки пушки на блоках, так, чтобы она не могла при отдаче отойти от вертикального положения.

Из всего этого следует, что у Декарта не было и мысли о какой-либо количественной характеристике зависимости

между весом и расстоянием. В этом отношении его отделяет от Ньютона громадное расстояние — теория Ньютона кажется принадлежащей другой эпохе. Так же далеки мысленные эксперименты Декарта и его довольно неопределенные ссылки на опыт от экспериментов Ньютона.

Во времена Декарта некоторые физики развивали идею тяготения, действующего на расстоянии, разумеется, в примитивной форме, не сравнимой с ньютоновской системой. Декарт резко протестовал против подобных идей. Он видел причину тяжести в давлении небесного флюида на тела. Этот флюид, состоящий из частиц второго элемента, окружает Землю и, вращаясь с Землей вокруг ее оси, испытывает центробежную силу, отталкивающую частицы второго элемента от Земли. Здесь Декарт ссылается на абсолютную заполненность пространства и утверждает, что частицы второго элемента могут удалиться от Земли только при том условии, чтобы тела равного объема приблизились к Земле. Поэтому движение частиц небесного флюида, направленное благодаря центробежной силе от Земли, заставляет находящиеся в атмосфере тела приближаться к Земле. В этом и состоит причина тяжести. Декарт хотел доказать свою теорию тяготения опытами. Он помещал небольшие шарики различной плотности в сосуд и приводил этот сосуд во вращение. При этом свинцовые шарики приближались к периферии, а легкие деревянные шарики оказывались в центре сосуда. Этим опытом Декарт иллюстрировал свою гипотезу о центробежном движении небесного флюида и противоположном, центростремительном движении тел, находящихся в атмосфере. Чтобы объяснить, почему именно тяжелые тела стремятся к Земле, Декарт утверждал, будто воздух, состоящий из мелких частиц, увлекается небесным флюидом к периферии, а плотные тела, например камни, уступая место воздуху, стремятся к Земле.

В теории тяготения Декарта немало совершенно произвольных допущений, фантастических картин и неопределенных количественных характеристик, вроде исчезновения тяжести на большом расстоянии. Однако картезианская теория тяготения встречала широкое сочувствие, она отказалась от дальнодействия и оставалась целиком на почве механической причинности. Только новые факты и соответствие между законами ньютоновской механики и наблюдениями заставили естествоиспытателей отказаться

от теории вихрей. Д'Аламбер писал об этой теории: «...смею сказать, в свое время нельзя было придумать ничего лучшего этих вихрей, ныне сделавшихся смешными. Астрономические наблюдения, благодаря которым они были отвергнуты, были тогда еще несовершенны или недостаточны. Поэтому не было ничего естественнее, чем предположить существование жидкого потока, несущего планеты. Только длинный ряд открытий, соображений и вычислений мог заставить отказаться от столь увлекательной теории; ее особое преимущество было в том, что она давала объяснения тяжести тел действием центробежной силы вихря, я не боюсь признать, что это объяснение тяжести — одна из прекраснейших и остроумнейших гипотез в философии. Вот почему физики оставили ее только как бы против воли, будучи увлечены теорией центральных сил и позднейшими опытами» [27].

В XVIII в., особенно в первой половине, большое число физиков объясняло тяготение кинетическими моделями в духе Декарта. Мы остановимся на взглядах Гюйгенса. Гюйгенс глубоко усвоил основные методологические принципы Декарта, но отказался от большинства произвольных гипотез картезианской физики.

Гюйгенс считал неудачной теорию тяготения, выдвинутую Декартом. Однако его собственное решение проблемы шло в методологическом отношении по следам Декарта.

Исходным пунктом концепции Гюйгенса были исследования, посвященные центробежной силе. Если тело движется по кривой, то направление его движения относительно некоторых координатных осей непрерывно меняется, а значит меняется и скорость в отношении этих осей. Поэтому криволинейное движение можно рассматривать как движение с некоторым непрерывным изменением скорости. Ускорение производится постоянно действующей на тело силой. Груз, привязанный к нити и приводимый во вращение, отклоняется от прямолинейного пути и движется по кривой благодаря силе натяжения нити, направленной от тела к центру. Натяжение нити по отношению к грузу является центростремительной силой, но оно действует и на центр, тянет его к грузу и в этом смысле выступает как центробежная сила. Гюйгенс установил, что центростремительное ускорение должно быть тем больше,

[27] J. d'Alembert. Oeuvres, v. I. Paris, 1821, p. 69.

чем быстрее движется тело, и что в равных кругах оно пропорционально квадрату скорости движения. Движение по кругу — результат равновесия центростремительных и центробежных сил, к которым прибавляется сила инерции, направленная по касательной. Центробежной силой Гюйгенс объяснил замедление хода часов с маятником, которые Рише в 1671 г. привез из Парижа в Кайенну. Центробежная сила значительнее всего на экваторе. Она действует в сторону, противоположную тяжести, и уменьшает последнюю по мере приближения к экватору. Поэтому ускорение маятника, производимое его тяжестью, уменьшается, когда часы попадают в тропическую область.

Гюйгенс воспользовался понятием центробежной силы, чтобы дать кинетическую теорию тяготения. Во вращающейся жидкости, например в воде, плавающие легкие шарики будут отталкиваться к центру вращения. Движение легких шариков к центру аналогично выталкиванию их водой по закону Архимеда. Так или иначе, они тяготеют к центру вращающейся жидкости. Декарт хотел подобной аналогией объяснить тяготение тяжелых тел к центральному телу, которое он рассматривал как центр вращающегося жидкого вихря. Гюйгенс в своей «Диссертации о причине тяжести» показал, что тяжесть не может быть объяснена центробежной силой вихря, кружащегося вокруг Земли. В этом случае тяжесть была бы направлена не к центру, а к оси Земли, служащей осью вихря. Действие центробежной силы везде, кроме экватора, направлено не по радиусу Земли, а по радиусу параллели. Далее Гюйгенс, подходя к теории тяготения с более строгим количественным критерием, показывает, что вихревое движение должно быть гораздо быстрее, чтобы объяснить силу тяжести на земной поверхности. Наконец, тяжесть должна быть обратна плотности, так как наиболее плотные тела стремились бы к периферии вихря. Поэтому Гюйгенс предполагает, что небесный флюид, вызывающий своим движением тяжесть земных тел, перемещается относительно Земли в разные стороны. Частицы этого флюида описывают вокруг Земли самые разнообразные круги, и поэтому общим центром их служит центр Земли.

Перейдем к другой функции эфира — распространению света.

Теория света Декарта изложена в «Трактате о свете», «Диоптрике», некоторых главах «Метеоров», в третьей

части «Начал философии», а учение о восприятии света — в трактате «О человеке». Однако, рассматривая законы преломления света в «Диоптрике», распространение его от Солнца и звезд в «Началах», а физиологическую оптику — в трактате «О человеке», Декарт в сущности не дал ясного представления о том физическом процессе, который лежит в основе распространения света. В оптических работах Декарта много внешних аналогий. Много места, например, уделено аналогии между наблюдателем, воспринимающим изображение предметов, и слепым, ощупывающим предметы палкой. Пользуясь этой аналогией, Декарт говорил, что свет, испускаемый телами, представляет собой быстрое движение, которое доходит через воздух или другие прозрачные среды до глаза так же, как движение или сопротивление тела доходит до руки слепого через палку. «Вам не должно казаться странным, что лучи света могут мгновенно распространяться от солнца до нас, ибо известно, что действие, приводящее в движение один конец палки, в одно мгновение доходит до другого и что оно должно таким же образом и распространяться даже в этом случае, если бы расстояние было больше, чем то, которое отделяет землю от небес» [28].

При помощи той же аналогии Декарт разъясняет различные цвета: «...разница, усматриваемая слепым между деревьями, камнями, водой и другими подобными предметами с помощью своей палки, не кажется ему меньшей, чем та, которая существует между красным, желтым, зеленым и любым другим цветом» [29].

Декарт говорил, что слепой может воспринимать свойства окружающих его тел не только в том случае, когда эти тела толкают палку, но и когда он, ощупывая тела палкой, приводит в движение самую палку. Точно так же можно представить себе, что из глаз выходят лучи, ощупывающие предметы. Подобное представление — пережиток античных догадок — сохранялось еще в XVII в. Декарт считал его справедливым в отношении животных, видящих в темноте. Человек воспринимает свет и краски лишь в том случае, когда сами предметы светятся или освещены и воздействуют на глаза.

---

[28] Р. Декарт. *Рассуждение о методе*. М.— Л., 1953, стр. 71.
[29] Там же.

По мнению Декарта, луч света представляет собой смещаемую часть среды, находящейся между глазом и предметом. Эта среда состоит из частиц второго элемента. При этом Декарт отнюдь не думал, что смещение постепенно передается от точки к точке вдоль луча. Смещаемая часть второго элемента — это действительно палка, абсолютно жесткое тело, передающее свет с бесконечной скоростью, мгновенно. Декарт придавал решающее значение бесконечной скорости распространения света. В письме к Бекману, возражавшему против моментальной передачи света, Декарт говорил: «Мне эта теория представляется столь несомненной, что если бы — что невозможно — была доказана ошибочность ее, я готов был бы признать себя человеком, решительно ничего не понимающим в философии. Вы настолько доверяете нашему опыту, что декларируете свою готовность признать всю вашу философию ложной, если нет никакого промежутка времени между моментом, когда видно движение фонаря, и моментом, когда он приведен в движение. Я же заявляю вам, что если бы этот промежуток времени был установлен наблюдением, вся моя философия была бы поколеблена до основания» [30].

Действительно, представление о постепенной передаче деформации от точки к точке трудно сформулировать в ортодоксальных картезианских понятиях. Не Декарт, а Гюйгенс мог построить теорию световых волн, движущихся с конечной скоростью. Волновая теория света Гюйгенса появилась в годы широкого распространения корпускулярной теории. Важнейшим аргументом корпускулярных представлений о свете было его прямолинейное распространение. Если бы свет имел волновую природу, он обходил бы препятствия, и тень не имела бы резких границ, отделяющих ее от освещенного пространства. Однако именно такие явления были открыты Гримальди, описавшим в 1665 г. дифракцию света.

В 1678 г. Гюйгенс представил Парижской академии доклад о волновой природе света. Вскоре после этого религиозные преследования заставили его покинуть Париж, и только в 1690 г. на родине Гюйгенса, в Лейдене, вышел его «Трактат о свете».

---

[30] R. Descartes. Oeuvres, publiés par Adam et Tannery, t. 1. Paris, 1897, p. 307.

Остановимся на содержании этого трактата.

Исходным пунктом рассуждений Гюйгенса является представление о свете как о движении материи. Однако скорость распространения света и беспрепятственное прохождение световых лучей друг через друга убеждают Гюйгенса, что свет нельзя рассматривать как поступательное перемещение материальных частиц[31].

Аналогия с распространением звука раскрывает действительную природу света. Гюйгенс формулирует волновую теорию света и приводит ряд доказательств, одним из которых служит конечная скорость распространения света.

Свет возникает благодаря толчкам, которые движущиеся частицы тел наносят частицам эфира. Последний состоит из чрезвычайно твердых частиц. Твердость объясняет громадную скорость распространения света. Гюйгенс не останавливается на причинах твердости частиц эфира, но мимоходом бросает мысль о сложном составе частиц эфира и о бесконечной иерархии частиц материи, объясняющей сложность явлений природы. Для того чтобы объяснить распространение света при помощи упругих сил, «ничто не мешает нам считать частицы эфира состоящими из материи, сколь угодно приближающейся к совершенной твердости и сколь угодно быстро восстанавливающей свою форму. Нам нет надобности исследовать для этого здесь причины этой твердости и упругости, так как рассмотрение их завлекло бы нас слишком далеко от нашего предмета. Я все же укажу здесь мимоходом, что частицы эфира, несмотря на их малость, можно себе представить состоящими еще из других частей и что упругость их заключается в очень быстром движении тонкой материи, которая проходит сквозь них со всех сторон и заставляет их ткань располагаться так, чтобы она позволяла этой очень тонкой материи проходить через нее самым легким и свободным образом. Это согласуется с объяснением, которое дает упругости Декарт, но только я не предполагаю, как он, существования пор в форме полых круглых каналов. И не нужно думать, что в этом имеется что-нибудь нелепое или невозможное. Наоборот, представляется весьма вероятным, что природа как раз и пользуется этой бесконечной последовательностью частиц различной вели-

[31] См. Х. Гюйгенс. Трактат о свете. М.— Л., 1935, стр. 12.

чины, обладающих различной скоростью, чтобы производить такое множество удивительных явлений» [32].

Каким же образом распространяются световые волны? Здесь Гюйгенс формулирует знаменитый волновой принцип, который заключается в том, что «каждая частица вещества, в котором распространяется волна, должна сообщать свое движение не только ближайшей частице, лежащей на проведенной от светящейся точки прямой, но необходимо сообщает его также и всем другим частицам, которые касаются ее и препятствуют ее движению. Таким образом, вокруг каждой частицы должна образоваться волна, центром которой она является» [33].

Гюйгенс на основе волновой теории света объясняет явления отражения и преломления света. С точки зрения корпускулярной теории Ньютона, при переходе света в более плотную среду световые частицы притягиваются частицами среды и приобретают дополнительное ускорение, перпендикулярное поверхности плотной среды. Поэтому они отклоняются, приближаясь к перпендикулярному направлению относительно поверхности раздела двух сред. Гюйгенс рисует иной механизм преломления света. Световая волна, коснувшись поверхности более плотной среды, возбуждает в ее точках новые волны, более медленные, чем в первой среде. При наклонном направлении света, падающего на поверхность плотной среды, различные лучи светового пучка в разные моменты времени достигают этой поверхности, и поэтому волны в новой среде возникают в различное время. Поэтому в каждый данный момент фронт световой волны будет находиться на различных расстояниях от поверхности раздела, и, таким образом, свет будет преломлен.

Одной из важнейших эмпирических основ волновой теории света была противоречившая взглядам Декарта конечная скорость распространения света. Впервые скорость света была вычислена с относительно большой точностью благодаря астрономическим наблюдениям Олафа Ремера. В 1675 г. Ремер обнаружил некоторое опережение или запаздывание затмения медицейских звезд, т. е. спутников Юпитера, в зависимости от того, на каком расстоянии в это время Юпитер находится от Земли. Когда Юпитер

---

[32] Х. Гюйгенс. Трактат о свете, стр. 24—25.
[33] Там же, стр. 31.

находится дальше от Земли, затмение спутников, их погружение в тень Юпитера происходит с опозданием, а когда планеты находятся ближе всего друг к другу, затмение начинается несколько раньше. Ремер объяснил эту разницу тем обстоятельством, что в первом случае свету требуется больше времени, чтобы пройти от Юпитера до Земли. Зная расстояние между Землей и Юпитером и определив запаздывание и опережение затмений спутников Юпитера, можно было вычислить скорость света. Она оказалась очень близкой к известной нам сейчас скорости света в пустоте, т. е. 300 тысяч километров в секунду.

## 5. Картезианская физиология

Задача физики Декарта не была бы выполнена, если бы он не попытался объяснить чисто кинетическими моделями явления жизни. В картезианской физиологии особенно много произвольных гипотез, но вместе с тем здесь ясно видна связь между системой Декарта и положительным развитием физиологии XVII—XVIII вв. Какая основная идея толкала вперед физиологические знания этого времени? Какая идея объединяла физиологию с другими дисциплинами, включала физиологические открытия в общую картину мира? На оба вопроса можно дать один ответ. Создателей физиологии вдохновляла идея механического объяснения явлений жизни. Физиологические открытия XVII в. укладывались в общую картину мира в той степени, в какой они получали механическое истолкование. Кеплер рассматривал глаз по аналогии с оптическими приборами, и, поскольку оптика принципиально считалась областью механического объяснения, анатомия и физиология глаза становились частью общей картины природы. Механика животного организма, разрабатывавшаяся Борелли, была существенной частью его общих механических представлений. Великое открытие Гарвея сразу нашло себе место в механической натурфилософии, главным образом благодаря тому, что нарисованная Гарвеем картина кровообращения легко поддавалась механической интерпретации. Когда Декарт отождествил тело животного с механизмом, это было выражением действительных стремлений физиологии XVII в. Борелли и его последователи, так называемые иатромеханики, уподобили организм машине в той исторически ограниченной форме, которую машина

имела в XVII в. Они сводили биологические процессы к механическим непосредственно, минуя процессы, которые мы сейчас бы назвали биофизическими и биохимическими. Иатромеханики объясняли пищеварение механическим растиранием и размельчением пищи и считали принципиально недопустимым прибегать к химическим реакциям для объяснения органических отправлений. Та же идея вдохновляла многочисленных конструкторов XVII—XVIII вв., создававших автоматические игрушки. Подобных игрушек было немало в XVII в. и еще больше в следующем. В XVIII в. особенно славилась утка, изготовленная Вокансоном. Ему принадлежит также фигура музыканта, который в определенном порядке открывал и закрывал отверстия флейты. Можно думать, что Вокансоном руководила не только конструктивная изощренность, но также более или менее сознательное отождествление организма и машины. Во всяком случае, эта мысль поддерживала интерес к конструкциям Вокансона в наиболее прогрессивных кругах европейского общества, интерес, ни в коей мере не сводившийся к простому любопытству. Сказанное относится также и к еще более сложным конструкциям Дрозов. Старший Дроз построил механического мальчика, который писал пером, младший Дроз изготовил пианистку, которая не только играла пьесу, но также двигала глазами, следя за клавишами, и, окончив игру, кланялась публике.

«Было бы непостижимо,— писал Гельмгольц,— что люди, по изобретательности не уступавшие наиболее выдающимся умам нашего столетия, посвятили столько времени и труда, положили бездну остроумия на устройство этих автоматов — для нас не более как детских игрушек, если бы они не верили в возможность истинного успеха» [34].

Гельмгольц прав. Если инквизиция, посадившая в тюрьму Дроза с его механическим мальчиком, искренне была убеждена в том, что механика может создать живого человека, то и сами конструкторы надеялись на успех этого фантастического замысла. Он был фантастическим, но не был реакционным, мистическим. Большинство конструкторов не верило в магию и, во всяком случае, не рассчитывало магическими приемами вдохнуть живую душу

---

[34] Г. Гельмгольц. О взаимодействии сил природы. «Популярные речи», ч. 1. СПб., 1896, стр. 3.

в совокупность колес и рычагов. Напротив, они думали, что и подлинные люди представляют собой, в сущности, комбинацию простейших механических элементов. Таким образом, не магия, а крайняя форма механического объяснения явлений была идейной основой конструирования автоматических игрушек.

Разумеется, иллюзии исторических прообразов кукольного мастера из «Коппелии» лежали вне естествознания, но они представляли собой предельное выражение естественнонаучной идеи. Наиболее важным натурфилософским выражением этой идеи была картезианская физиология. Декарт утверждал, что лишь животные тождественны машинам, но в XVIII столетии этот тезис был распространен и на человека.

Декарт рисует следующую картину. Все частицы, из которых состоит человеческий организм, собраны где-то воедино и размещены так же, как в теле человека. Подобная совокупность движущихся частиц не будет по своему составу, структуре и движениям отдельных частиц отличаться от человеческого тела. Будет ли эта совокупность материальных частиц человеком, спрашивает Декарт? Ответ он дает отрицательный: построенный таким образом механизм окажется неодушевленным, он не будет обладать мыслящей душой. Здесь граница не только кинетической физиологии Декарта, но и всей его физики. Другое дело, если соединить частицы, из которых состоит организм животного. В этом случае построенный организм ничем не будет отличаться от живого существа. Животные ничем не отличаются от машин. Они не обладают ощущениями и мышлением. Но это значит, что механическая конструкция может объяснить все жизненные отправления животных, а также те отправления человеческого организма, которые сходны с жизненными отправлениями животных.

Построив человеческий организм из материальных частиц, Декарт искал силу, которая приведет в движение все его элементы. Такую силу он видел в теплоте. Теплота объясняет кровообращение. В своей теории кровообращения Декарт следует за Гарвеем, опираясь при этом на собственные анатомические наблюдения. Если в области анатомии Декарт обладал известным запасом действительных знаний, то физиология середины XVII в. давала еще слишком мало материала для построения всеохватывающей теории жизненных отправлений. Поэтому физиологические

представления Декарта вообще и представление о кровообращении в частности включают еще больше фантастических гипотез, чем картезианская космогония. Теория Гарвея, по мнению Декарта, доказывает, что физиологические проблемы можно целиком свести к механическим причинам и разъяснить чисто пространственными, количественными понятиями. В «Трактате о свете» Декарт предполагает, что тела людей, населяющих некоторый гипотетический мир, вполне подобны нашим. В тело каждого обитателя мира Декарта бог не вложил разумной души, но зажег в его сердце пламя, аналогичное тому, которое заключено в бродящем веществе или в самопроизвольно нагревающемся влажном сене. Наличие такого постоянного источника теплоты в теле человека может вызвать все органические отправления, свойственные живым существам. Таким образом, жизнь отнюдь не связана с существованием какой-либо нематериальной силы. Чисто механические процессы объясняют все жизненные отправления животных. Аналогичные отправления человеческого организма также происходят чисто механически. Достаточно предположить, что в теле человека находится постоянный источник тепла,— и жизненные отправления могут быть выведены из этого предположения. Однако здесь физика Декарта наталкивается на теологическую границу.

«...Исследуя те функции, какие могли вследствие этого иметь место в данном теле,— пишет Декарт,— я там нашел в точности все то, что может происходить в нас, не сопровождаясь мыслями, и, следовательно, без участия души, то есть той отличной от тела части, природа которой, как сказано выше, состоит только в мышлении. Это как раз те проявления, в которых лишенные разума животные, можно сказать, подобны нам. Но я не мог найти в таком человеке ни одной из функций, зависящих от мышления и принадлежащих только нам как людям, зато я нашел их там впоследствии, предположив, что бог создал разумную душу и что он соединил ее с этим телом определенным образом, как я описал» [35].

Таким образом, Декарт ограничивает механическую точку зрения в физиологии всеми теми отправлениями, которые свойственны как человеку, так и животным. Душевные движения свойственны только человеку и объясняют-

[35] Р. Декарт. Избранные произведения, стр. 293.

ся метафизически, наличием соединенной с телом разумной души. Но в сфере физиологических отправлений, свойственных, по мнению Декарта, как человеку, так и животным, картезианская физика не допускает никакого намека на нематериальные факторы. Путем детальных и в значительной степени произвольных построений Декарт доказывает чисто механический характер физиологических процессов. Нагромождая специально придуманные анатомические детали, клапаны, трубки, нити и тому подобное, Декарт не останавливался ни перед одним неясным в то время пунктом физиологического исследования. Ему нужно показать, что чисто механические причины могут объяснить все явления природы, и там, где наука не дает для этого достаточно фактического материала, он, не сворачивая ни на один шаг в сторону, нагромождает гипотезы. В результате из первоначальных механических постулатов выводится вся картина конкретных проявлений жизни. Декарта нисколько не заботила фантастичность отдельных картин. Для него достаточно, если эти картины возможны — тем самым уже доказана однозначность универсальной механической картины мира. Поэтому физиология Декарта, где самые сложные явления объясняются чисто механическими причинами, является для ее творца не слабым местом, каким ее считали естествоиспытатели и философы следующих поколений, а, напротив, высшим выражением научного метода картезианской физики.

# III. ДИНАМИЗМ

## 1. Физика принципов

Естествознание последней четверти XVII и первой половины XVIII столетия значительно отличается от естествознания первой половины и середины XVII в. не только по уровню позитивных знаний, но и по стилю научного творчества. Концепции Галилея и его современников обладали известной гибкостью и незавершенностью. Понятия инерции, массы, ускорения, силы еще не получили твердого и отчетливого содержания, и соответствующие термины применялись в различных значениях. В этот период не было и столь твердых, застывших границ между различными областями науки, какие обозначились в посленьютоновском естествознании. Природа в гораздо меньшей степени, чем впоследствии, рассматривалась как нечто абсолютно неизменное. Представление о неизменности природы постепенно становилось все более отчетливым и достигло особенно резкой формы в тех направлениях естественнонаучной мысли, которые Энгельс назвал естествознанием «*старой* ньютоно-линнеевской школы» [1].

История науки показывает ограниченность ньютоно-линнеевского естествознания, но вместе с тем рассматривает его как важнейший исторический этап построения научной картины мира. На первый взгляд понятие картины мира меньше применимо к этому периоду, отмеченному именами Ньютона и Линнея, чем к предыдущему. После Ньютона гипотетические картины картезианской физики постепенно выходят из доверия, наука дифференцируется, и исследователи, замкнувшиеся в рамках отдельных дисциплин, не склонны рисовать универсальные картины кос-

[1] К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, 2-е изд., т. 20. М., 1961, стр. 565.

моса. Мало того, в науке развивается феноменологическая традиция, и знаменитое заклинание Ньютона против гипотез в некоторой мере замораживает построение наглядных картин и моделей. И тем не менее, естествознание конца XVII и первой половины XVIII в. не только создавало научную картину мироздания, но эта картина была исторически более высокой, чем воззрения предшествующего периода. Такая оценка прежде всего относится к системе Ньютона. Благодаря механике Ньютона картина мира стала несравненно более достоверной, она строгим и однозначным образом обобщила проверенные экспериментом эмпирические сведения, она стала четкой, потеряла свой расплывчато-качественный характер, включила точные количественные соотношения.

Это была механическая картина мира. В те времена в научных кругах мысль об абсолютной сводимости законов природы к законам классической механики казалась почти сама собой разумеющейся. Ньютоновы «Математические начала натуральной философии», вышедшие в 1687 г., стали евангелием науки. Прежде чем перейти к анализу исторических истоков классической механики, к характеристике метода Ньютона, разбору классического учения о пространстве и движении и изложению закона тяготения, следует дать общее представление о структуре этого произведения.

«Математические начала натуральной философии» состоят из трех книг. В первой книге рассматриваются движения тел под влиянием сил, во второй — те же движения в сопротивляющейся среде и в третьей — система мира. В начале первой книги Ньютон дает определения количества вещества, количества движения, инерции и силы. Затем идет «Поучение», где определяются абсолютное и относительное время, пространство и движение. Далее помещены знаменитые классические законы и некоторые их следствия. Первоначальные определения «Поучения» и формулы классических законов представляют собой в совокупности введение ко всей книге. После такого введения Ньютон излагает основные законы движения тел, а также некоторые понятия анализа бесконечно малых. Эта часть «Начал» должна помочь читателю усвоить последующие доказательства ряда механических теорем. После этого Ньютон на протяжении семи отделов разбирает движения тел, к которым приложены центральные силы. Основные

теоремы этой части «Начал» посвящены движениям материальных точек, притягивающих друг друга с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Далее Ньютон переходит от притяжения материальных точек к притяжению тел.

Вторая книга посвящена движению тел в сопротивляющейся среде и движению и равновесию жидкостей. Ньютон рассматривает, как будет двигаться в сопротивляющейся среде тело, находящееся под воздействием силы тяготения, в частности рассматривает движение маятника в сопротивляющейся среде. Кроме того, здесь формулируются законы гидростатики. Одна из основных идей этой части «Начал» — опровержение вихревой теории Декарта. Ньютон исследует вопрос о вращении жидкости и приходит к заключению, что такое вращение не может объяснить движение планет.

В третьей книге «Начал» изложена астрономическая система мира. Ей предпослана методологическая декларация Ньютона «Правила философствования». Затем Ньютон перечисляет основные астрономические наблюдения, на основе которых при помощи всего предыдущего материала «Начал» можно получить истинную картину Вселенной. Из таких наблюдений выводится тезис об универсальности тяготения, пропорционального массам тел.

Далее Ньютон излагает законы движения Солнца и планет. В конце книги доказывается, что Земля, как и всякая вращающаяся вокруг своей оси планета, должна быть сжата вдоль оси вращения. Ньютон рассматривает далее вес тел в разных географических точках и, наконец, объясняет приливы притяжением небесных тел. Во втором и последующих изданиях «Начал» в этот раздел были внесены теоремы о движении Луны под влиянием возмущающего воздействия солнечного притяжения. Наконец, как заключение ко всей книге в целом, помещено «Общее поучение» с некоторыми теологическими и натурфилософскими соображениями.

В 1713 г. вышло второе издание «Начал». По поручению Ричарда Бентли — начальника колледжа, где Ньютон был профессором, это издание редактировал Роджер Котс, фанатичный враг материализма и картезианства. Он написал предисловие, направленное против картезианских воззрений и подчеркивавшее религиозно-апологетические мотивы книги Ньютона.

Каковы самые основные идеи «Начал»?

Ньютон неоднократно указывает, что единственный источник его законов — наблюдение и эксперимент. Эти утверждения и знаменитая фраза Ньютона: «гипотез я не измышляю» (hypotheses non fingo) впоследствии стали лозунгами ограниченного индуктивизма, в науке XVIII—XIX вв. Из опыта, по мнению Ньютона, можно вывести основные определения материи, пространства, времени и движения. Материя отличается от пространства, материальные тела движутся в пустоте. Пустое пространство неподвижно и абсолютно. Перемещение в этом пространстве — абсолютное движение. Причина, вызывающая абсолютное движение,— сила, приложенная к телу. Она пропорциональна ускорению. Движения небесных тел происходят под влиянием инерции и тяготения, заставляющего тела обращаться по эллиптическим орбитам вокруг центральных тел, к которым они тяготеют. Тяготение пропорционально массам, обратно пропорционально квадрату расстояния между телами и связывает все материальные тела природы. Закон всемирного тяготения объясняет, почему система мира сохраняет неизменное движение после «первоначального толчка, которым бог привел ее в движение».

Каковы были исторические корни перечисленных идей Ньютона?

Чисто кинетическая картезианская физика должна была в некоторой степени уступить место новым взглядам под влиянием двоякого рода обстоятельств. Во-первых, она была исторически прогрессивной общей декларацией механицизма, но не давала однозначных ответов на частные вопросы, загромождала науку фантастическими гипотезами, произвольными моделями и априорными конструкциями. Благодаря накоплению естественнонаучных знаний, связанному с развитием производительных сил XVII в., наука выросла из тесной одежды картезианских вихрей и элементов, каждое крупное открытие приходилось согласовывать со старыми кинетическими гипотезами при помощи наспех придуманных новых гипотез, и картезианская физика стала походить на обветшавший дом, в котором хаотично устанавливаемые подпорки не столько поддерживают разрушающиеся стены, сколько угрожают раздавить их своим весом. Для развития естествознания требовались новые идеи и методы, и прежде всего возмож-

ность пользоваться законами, кинетическая природа которых еще не была ясна науке.

Но антикартезианские тенденции вытекали и из другого источника. Картезианство угрожало религии, и картезианское естествознание было подозрительным не только в глазах защитников феодальной старины, но и в буржуазных кругах. Необходимо было защитить авторитет церкви или, по крайней мере, авторитет «естественной религии» от материалистических и атеистических выводов науки. Дело в том, что кинетическое мировоззрение недолго держалось в границах картезианского дуализма. Если в философии Декарта физика оттородилась от метафизики, оставив неприкосновенной субстанциальность духа и тем купив себе право на относительную независимость, то в системе Спинозы физика не остановилась перед границей, которой окружил ее дуализм. Протяженная субстанция претендует на роль единственной субстанции. Этот материалистический смысл философии Спинозы был не сразу разгадан друзьями, но его сразу же почувствовали враги. На Спинозу обрушились не только теологи, но и деисты.

Реакция против материалистических выводов кинетизма не ограничивалась травлей Спинозы. Защитники религии стремились пересмотреть исходные понятия естествознания и именно здесь добиться компромисса, исходящего из необходимости развития науки и недопустимости ее гносеологических выводов. Выход, хотя и иллюзорный, был найден Лейбницем, величайшим гением компромисса.

Воззрения Лейбница мы будем рассматривать ниже. Сейчас остановимся на развитии динамических понятий механики в Англии.

Особенности развития науки в Англии XVII в. связаны с более высоким, чем на континенте, уровнем промышленности и, с другой стороны, с классовым компромиссом, которым закончилась борьба английской буржуазии с землевладельцами. В Англии создались своеобразные отношения между естествознанием и религией. Казнь Джордано Бруно, запрет пропаганды коперниканства и, наконец, осуждение Галилея направили итальянскую науку в русло чисто эмпирических исследований и ограничили этим руслом деятельность Флорентийской академии и других научных организаций XVII в. Деятельность конгрегации индекса, иезуитов и инквизиции распространялась на весь католический мир, ограничивая и коверкая свободу науч-

ного творчества. В Англии религиозная реакция стремилась опереться на естествознание. В Италии Шейнер слал доносы на Галилея в инквизицию, в Англии Бентли и Котс издавали сочинения Ньютона, подчеркивая теологические элементы его взглядов. Религиозная апологетика приняла здесь буржуазную форму и подбирала естественнонаучные аргументы против материализма. В первой бойлевской лекции (они читались с 1692 г., по завещанию *Бойля, «в защиту христианской религии против неверных*, именно: атеистов, деистов, язычников, евреев и магометан») Бентли говорил, что не священными книгами нужно опровергать атеизм, а «мощными томами видимой природы и вечными таблицами здравого разума».

Такова была идейная среда, в которой развивались динамические воззрения в английской науке. Эта среда закрепляла, гипертрофировала, распространяла, продолжала по касательной закономерный виток кривой познания. В чем состоял этот виток? Рассмотрим несколько ближе особенности ньютоновского метода, получившего впоследствии название *физики принципов*, противопоставленной картезианской *физике моделей*.

В третьей книге «Математических начал натуральной философии» Ньютон поместил «Правила философствования» (Regulae philosophandi). А. Н. Крылов переводит это название как «Правила умозаключений в физике». Действительно, в Англии не только во времена Ньютона, но и сейчас под «натуральной философией» понимают положительное естествознание. Англичане называют обыкновенный термометр «философским инструментом». В таком употреблении термина «философия» сказывается традиция, идущая от Бэкона и Ньютона. В «Правилах философствования» формулируется так называемый индуктивный метод. Первое правило гласит: «Не должно принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений». Следующие три правила требуют, чтобы одинаковым явлениям приписывались одинаковые причины, независимые и неизменные при экспериментах свойства тел, подвергнутых исследованию, принимались за общие свойства материальных тел и, наконец, чтобы законы, индуктивно найденные из опыта, считались верными, пока им не противоречат другие наблюдения. «Так должно поступать,— говорит Ньютон,— чтобы доводы наведения не уничтожались предположениями». Эта

антикартезианская декларация на первый взгляд действительно была абсолютным правилом ньютоновской механики, которая в глазах самого Ньютона и в глазах его учеников казалась лишенной гипотетических посылок, целиком основанной на фактах и именно поэтому окончательной, вечной, абсолютной. Для физики XVIII—XIX вв. «Начала» Ньютона были не только собранием исходных законов и теорем, но и образцом чисто индуктивного и поэтому абсолютно достоверного знания. В естественнонаучной литературе XIX в., особенно английской, было очень много панегириков в честь ньютоновского индуктивизма. Критическое исследование «Начал» показывает, однако, что Ньютон опирался на определенные гипотетические построения. Ньютоновская механика была картиной бесконечного мира, она распространяла индуктивно найденные представления на бесконечно большие масштабы Вселенной и на микроскопические явления. Предпосылкой, хотя бы и невысказанной, было выделение определенной стороны наблюдаемых явлений как существенной и абстрактное устранение других сторон. Атомистические гипотезы чаще всего были неявной, но тем не менее несомненной физической предпосылкой «индуктивной» механики Ньютона. Именно поэтому развитие атомистики в XVIII в. так часто принимало форму выяснения физической природы сил, феноменологически описанных и вычисленных в «Началах».

Дело в том, что наука во времена Ньютона еще не могла нарисовать однозначную и строгую кинетическую картину, объясняющую макроскопические силы. Поэтому для XVII в. индуктивизм Ньютона был преувеличенным, застывшим, абсолютизированным отказом от неоднозначных гипотез, от гипотез, которые в силу ограниченности знаний не могли дать требуемого строгого объяснения явлений. Но исторически здание ньютоновской механики не могло быть построено без гипотетических физических представлений. Аналогично и экспериментальный метод у Ньютона вовсе не был таким эмпирическим, каким он казался после уборки выполнивших свою миссию лесов. Эксперимент не может иметь места в науке без некоторой предварительной идеи, без некоторого представления о причинной связи фактов. Алхимические опыты проверяли, например, воздействие ртути на какой-то раствор; но ртути приписывалось это действие потому, что, скажем, крас-

ный цвет ее окиси — символ власти и т. п. Именно поэтому алхимические эксперименты не изменили общего строя научного мышления. Другое дело эксперименты XVII в. Они должны были доказать рациональную причинную связь — механическую связь между причиной и следствием. Прямым путем эта связь доказывалась механическими опытами, косвенным — оптическими, физическими и химическими. В основе экспериментального естествознания XVII—XVIII вв. лежала мысль об универсальной механической причинной связи между явлениями природы.

Следовательно, не самый эксперимент знаменует начало новой эпохи в естествознании, а особенности эксперимента, незнакомые прошлому и связанные с механическим характером той картины мира, которая проверялась, доказывалась, развивалась и усложнялась при помощи эксперимента.

Основой экспериментов и наблюдений, из которых Ньютон выводил свои законы, была идея механической связи между явлениями, идея, которая получила универсальное, хотя подчас и фантастическое, выражение в кинетической физике XVII в. Ниже мы увидим, что кинетические модели лежали в основе многих определений и законов, которым приписывалось чисто эмпирическое происхождение. Механика Ньютона опиралась на абстрактные категории пространства, времени, массы, силы и т. д. Но их нельзя было получить чисто индуктивным путем из каких-то определенных экспериментов. Генезис классической физики показывает неоднозначную связь эксперимента с выбором физической теории; связь, которую так энергично подчеркивал Эйнштейн (нам предстоит познакомиться с его высказываниями) и так убедительно продемонстрировала неклассическая физика. Уже на примере Галилея мы видели, что закон инерции не мог быть получен из какого-либо реального изолированного эксперимента, так как он требовал представления о причинности, само же это представление опиралось на очень широкую эмпирическую базу, оно вытекало из суммы известных тогда свойств физического мира. Поэтому легенда об аналитическом выведении законов из чистого эксперимента («избранных явлений», как писал Котс в предисловии ко второму изданию «Начал») не соответствует действительному пути построения механики Ньютона.

В действительности Ньютон, имея перед собой нерасчлененную и поэтому хаотическую картину движений, выделил из нее простейшие абстракции изолированного тела, затем — двух тел, действующих друг на друга, и т. д., переходя и дальше от более абстрактных понятий к менее абстрактным. Этот метод мы видели у Галилея и видим у Ньютона. Первый закон Ньютона основан на некоторых экспериментальных данных: «Брошенное тело продолжает удерживать свое движение, поскольку его не замедляет сопротивление воздуха и поскольку сила тяжести не побуждает это тело вниз» [2]. Почему здесь дискредитируется непосредственное наблюдение картины движущегося тела, почему именно сопротивление воздуха и тяжесть отброшены как несущественные компоненты движения, почему избрана лишь инерционная компонента? Разумеется, критерий для выделения именно этих, а не других сторон действительности связан с большим числом физических гипотез и очень далек от простой математической интерпретации эксперимента. Такое выделение невозможно без какой-либо явной или неявной гипотезы.

Приведем отрывок, в котором содержится знаменитое ньютоновское заклятье против кинетических гипотез. «До сих пор,— писал Ньютон,— я изъяснял небесные явления и приливы морей на основании силы тяготения, но я не указывал причины самого тяготения. Эта сила происходит от некоторой причины, которая проникает до центра Солнца и планет без уменьшения своей способности и которая действует не пропорционально величине *поверхности* частиц, на которые она действует (как это обыкновенно имеет место для механических причин), но пропорционально количеству *твердого* вещества, действие которой распространяется повсюду на огромные расстояния, убывая пропорционально квадратам расстояний. Тяготение к Солнцу составляется из тяготения к отдельным частицам его и при удалении от Солнца убывает в точности пропорционально квадратам расстояний даже до орбиты Сатурна, что следует из покоя афелиев планет, и даже до крайних афелиев комет, если только эти афелии находятся в покое. Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор

---

[2] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова. Изв. Николаевской морской акад., вып. IV. Пг., 1915, стр. 36—37. Изд. 3. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008.

не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю (Hypotheses non fingo). Все же, что не выводится из явлений, должно называться *гипотезою*, гипотезам же метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии.

В такой философии предложения выводятся из явлений и обобщаются при помощи наведения. Так были изучены непроницаемость, подвижность и напор тел, законы движения и тяготения. Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря» [3].

Здесь нужно иметь в виду характер картезианских гипотез. Каждая из них не была единственно возможным объяснением явлений. Между тем Ньютон именно и стремился установить такие начала естествознания, из которых строго и однозначно вытекали величины, полученные из астрономических наблюдений. Замысел Ньютона был в некотором отношении не менее грандиозным, чем замысел Декарта. Декарт освободил науку от перипатетических понятий и некаузальных представлений при помощи произвольных допущений. Ньютон хотел освободить науку от всякого произвола. Этого нельзя было сделать без решительного очищения естествознания от неоднозначных гипотетических выводов. Богословская трактовка не требовала однозначности научных построений. Теория была хороша, если она служила богословию, но по существу она была лишь произвольной иллюстрацией богословских принципов. Другая теория могла бы так же выполнить эту задачу. В славянском переводе «Источника знаний» Иоанна Дамаскина излагаются противоречивые концепции на том основании, что «обаче любо так, любо инако, все божиемь повелением бысть и утвердься». Католицизм также требовал от науки теорий «для вящей славы божией», что вовсе не определяло их однозначно.

Ньютон поставил перед наукой задачу полной однозначности. Каждая частная теория должна покоиться на бесспорных строгих основаниях. Бесспорное, единственно правильное, абсолютно точное объяснение природы — такова задача Ньютона. Поэтому и требуется очистить науку

---

[3] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 591—592. Изд. 3. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008.

от кинетических гипотез и изучать природу при помощи законов, точность которых доказана экспериментально.

Отрицанию гипотез противоречит на первый взгляд не только содержание, но даже название работ Ньютона. Одна из его статей, написанная в 1675 г., называется «Теория света и цветов, заключающая гипотезу объяснения свойств света, изложенных автором в предыдущих мемуарах, а также описание наиболее существенных явлений, различных цветов тонких пластин и мыльных пузырей, равным образом зависящих от ранее характеризованных свойств света». Однако в сопровождавшем статью письме есть указание на чисто дидактический смысл этой гипотезы.

В самом тексте статьи мы встречаем целый ряд кинетических гипотез об эфире — тонком газе, заполняющем безвоздушное пространство и объясняющем тяготение, электростатические явления, сцепление, упругость, распространение света, его преломление и т. д. Но эти гипотезы перемежаются с категорическими оговорками, предупреждающими о неоднозначности кинетических моделей. Предлагаемые гипотезы отнюдь не обязательны, и Ньютон заранее отказывается вступить в полемику по поводу гипотез. Таким образом, с методом Ньютона связаны некоторые характерные особенности его научного темперамента. Общеизвестная антипатия Ньютона к научно-литературной полемике объясняется тем, что предметом дискуссии обычно оказывались не количественные пропорции между экспериментально найденными величинами, а кинетические модели. Чтобы сделать свои идеи более наглядными и доступными для современников, Ньютону приходилось прибегать к кинетическим гипотезам. Он высказывал их очень неохотно, только из дидактических побуждений. Такие гипотезы оспаривались, и Ньютону приходилось снова и снова подчеркивать их условный, дидактический, неоднозначный характер. Оппоненты Ньютона, смешивая условные гипотезы с безусловными законами, называли теории Ньютона гипотезами, и это каждый раз действовало на Ньютона, как удар шпорой. В одном из писем Ольденбургу Ньютон говорит:

«Я прежде всего замечу, что учение мое о преломлении света и цветах состоит единственно в установлении некоторых свойств света без всяких гипотез о его происхождении.

Ведь самым лучшим и надежным методом в исследовании природы служит прежде всего открытие и установление опытами свойств этих явлений, а гипотезы относительно их возникновения можно отложить на второй план. Эти гипотезы должны подчиняться природе явлений, а не пытаться подчинять ее себе, минуя опытные доказательства. И если кто создает гипотезу только потому, что она возможна, я не вижу, как можно в любой науке установить что-либо с точностью: ведь можно придумывать все новые и новые гипотезы, порождающие новые затруднения» [4].

Эта мысль Ньютона содержала рациональное зерно. Каждый прогрессивный шаг в науке XVI—XVIII вв. утверждал объективность научных знаний, каждый из них был исторически связан с борьбой против нагромождения произвольных построений. Галилей выступал против кондиционалистской трактовки гелиоцентризма. Декарт противопоставлял средневековому, схоластическому взгляду на науку свое глубокое убеждение в объективности ее истин, убеждение, которое не могли скрыть никакие оговорки об условном «романе природы». Но картезианская физика содержала немало произвольных построений, немало попыток навязать природе априорные схемы. Ньютон выдвигает очень глубокое, исторически прогрессивное требование: гипотезы должны соответствовать объективной истине, объективным фактам, «подчиняться природе явлений, а не пытаться подчинять ее себе...» Ньютон говорил, что гипотезы, которые выставляются только потому, что они возможны,— источник неоднозначности, недостоверности, неопределенности в науке.

Отказ от гипотез был у Ньютона вовсе не таким категорическим, как это представлено в «Началах». Но условный характер «Hypotheses non fingo» доказывается не простыми ссылками на гипотезы Ньютона, а анализом их роли в построении основных понятий классической механики. К такому анализу мы перейдем в следующем параграфе, а сейчас остановимся на отношении Ньютона к абстрактным категориям.

Метод Ньютона, а вместе с тем и метод всего естествознания XVII—XVIII вв. можно проследить на примере

---

[4] Цит. по кн.: С. И. Вавилов. Исаак Ньютон. М.—Л., 1943, стр. 66—67.

небесной механики. С точки зрения закона всемирного тяготения строгое определение движения небесного тела, например Луны, сразу представляется неразрешимой задачей. Действительно, на движение Луны в той или иной степени влияют все небесные тела, связанные с ней тяготением. Наука XVII—XVIII вв. должна была выделить из картины бесконечной и универсальной зависимости всех явлений природы отдельные связи, отдельные ряды явлений, отдельные проблемы. В этом смысле расчленение природы было необходимым элементом, закономерным отрезком кривой познания. В небесной механике нужно выделить из универсальной связи взаимодействующих тел два тела и установить закон, управляющий взаимодействием этих двух тел. При изучении движения Луны следует сначала рассматривать только тяготение, связывающее Луну с Землей. При изучении движения Земли — силу, связывающую Землю с Солнцем. Таким образом, строится первое звено небесной механики — решенная Ньютоном задача двух тел, притягивающих друг друга.

Гораздо сложнее задача трех тел. Применительно к Луне она означает, что кроме притяжения Земли учитывается также притяжение Солнца. Задача трех тел была поставлена Ньютоном, но полного решения она не нашла и до сих пор. Изучая движение Луны, Ньютон дает приближенное решение. Впоследствии переход от абстрактной схемы двух взаимодействующих тел к более конкретному звену — тяготению трех тел — был основой разработанной в XVIII в. теории возмущений. Само собой разумеется, что наука не могла бы дойти до современного представления о единстве Вселенной без этих закономерных ступеней абстрактного анализа. Однако это выделение изолированных проблем из универсальной связи явлений могло быть лишь частным моментом, лишь ступенью в изучении природы. И у самого Ньютона, и у его учеников, и во всем естествознании XVII—XVIII вв. существовала тенденция абсолютизировать эти абстрактные представления, придавать им окончательный, застывший характер.

## 2. Учение Ньютона об эфире и веществе

Физические идеи, лежавшие в основе механики Ньютона, высказаны по преимуществу в его оптических работах. С точки зрения общей истории естествознания оптика

Ньютона имеет первостепенное значение, так как в ней обнажены самые глубокие физические, часто кинетические, иногда прямо картезианские по своему духу корни классической механики.

Исходным пунктом оптических экспериментов Ньютона были запросы практики. Создатели первых крупных телескопов столкнулись с так называемой сферической аберрацией, в силу которой лучи, прошедшие возле края сферической линзы, пересекаются несколько ближе к объективу, чем лучи, проходящие дальше от краев. Изучая преломление лучей в рефракторах, Ньютон обнаружил хроматическую аберрацию, состоящую в том, что лучи разных цветов собираются в разных фокусах сзади объектива рефрактора. В XVII в. применяли рефракторы гигантской длины, доходившей до 150 футов. При этом фокус фиолетовых лучей мог отдаляться от фокуса красных лучей на десятые доли дюйма. Для того чтобы избежать подобной аберрации, Ньютон предложил заменить рефракторы отражательными телескопами — рефлекторами.

После сооружения отражательного телескопа Ньютон изложил одно из своих величайших открытий, представив Королевскому обществу, куда он был принят после создания телескопа, доклад «Новая теория света и цветов». Этот доклад был результатом замечательных оптических экспериментов. В руках Ньютона эксперимент стал настолько точным и плодотворным орудием познания, что вся предшествующая экспериментальная физика кажется предысторией ньютоновских работ.

Эксперименты состояли в разложении солнечного луча стеклянной призмой. Ньютон пропускал луч через небольшое отверстие в темную комнату. Луч падал на призму, сзади которой стоял экран. Исследуя появившийся на экране спектр, Ньютон констатирует, что белый свет состоит из цветных лучей, которые, преломляясь в призме, отклоняются в различной степени. Ньютон измерил преломление различных частей спектра. Для этого он пропускал через отверстие в экране лучи одного цвета и заставлял их падать на призму. Оказалось, что наименьшим показателем преломления отличается красный цвет, а по направлению к фиолетовому концу спектра этот показатель возрастает.

Основные выводы из экспериментов сформулированы в следующих тезисах его доклада.

Цвета — это первоначальные прирожденные свойства света, они отнюдь не вызваны свойствами тел, преломляющих или отражающих световые лучи. Некоторые лучи по своей природе могут вызвать ощущение лишь красного цвета, другие — только желтого, третьи — зеленого и т. д. Цвет связан с преломляемостью. Данная степень преломляемости луча соответствует определенному цвету, и, наоборот, каждый цвет может быть вызван лишь лучами с вполне определенной степенью преломляемости. Лучи, которые преломляются меньше других видимых лучей, дают красный цвет, и, в свою очередь, красные лучи преломляются в наименьшей степени. Лучи, которые испытывают наибольшее преломление, дают фиолетовый цвет, и, наоборот, фиолетовые лучи обладают наибольшей преломляемостью.

Характерный для лучей цвет и соответствующая преломляемость не изменяются при отражении или преломлении света так же, как и по другим физическим причинам. Ньютон рассказывает, что он пропускал монохроматические лучи сквозь призмы, окрашенные среды, среды, освещенные другими лучами, но никогда не наблюдал появления иной окраски или иной степени преломления. При смешивании лучей различного рода происходит кажущееся изменение цвета, возникают новые цвета, свойственные смеси. При отделении различных лучей спектра друг от друга появляются их цвета, которыми не обладал смешанный свет, но они не возникают вновь, а лишь становятся видимыми благодаря разделению. Новые цвета, появляющиеся при смешении и разделении световых лучей, отнюдь не являются действительным превращением.

Соответственно Ньютон различает первоначальные и сложные вторичные цвета. Первоначальные цвета образуют спектр, который включает красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий, фиолетовый, пурпурный цвета и промежуточные оттенки.

Близкие друг к другу участки спектра дают при смешении промежуточные цвета: желтый с синим — зеленый, красный с желтым — оранжевый и т. д. Цвета, которые находятся в спектре далеко друг от друга, не дают промежуточных оттенков.

Белый цвет получается при соединении всех упомянутых выше цветов. Ньютон рассказывает, как, соединив вместе лучи, разделенные призмой, он получал белый свет,

который отличался от первоначального только в том случае, когда стекла были не вполне бесцветны.

Отсюда вытекает, что обычный свет, белый, представляет собой смесь лучей всех видов, испускаемых светящимися телами. Некоторые тела испускают лучи не в одинаковой пропорции, и тогда их свет оказывается окрашенным.

Изложенные представления полностью объясняют возникновение цветного спектра при прохождении света через призму: лучи в различной степени преломляются, а так как степени преломления соответствует определенный цвет, то белый цвет распадается на свои составные элементы. Таким же образом, т. е. различным преломлением лучей разного цвета, объясняется появление радужных цветов в падающих дождевых каплях.

Далее Ньютон объясняет различную окраску некоторых тел при перемене их положения. Различные вещества отражают свет одного рода и пропускают свет другого рода. Поэтому в том случае, когда свет в наибольшей степени отражается поверхностью тел, эти тела оказываются окрашенными иначе, чем при таком положении, когда они поглощают большую часть света.

Ньютон объясняет разложением света явление, обнаруженное Гуком: два сосуда с прозрачными окрашенными жидкостями вместе оказываются непрозрачными. «Один сосуд пропускает только красный, другой — только синий лучи. Поэтому через оба вместе не могут пройти никакие лучи».

Различные окраски естественных тел объясняются, согласно теории Ньютона, различной способностью тел отражать некоторые световые лучи в большей степени, чем другие.

Ньютон заканчивает изложение своей теории указанием на субстанциальность света: «Мы видели, что причина цветов находится не в телах, а в свете, поэтому у нас имеется прочное основание считать свет субстанцией...» [5]

Однако уже здесь Ньютон отказывается строить физические гипотезы: «Не так легко, однако, с несомненностью и полно определить, что такое свет, почему он преломляется и каким способом или действием он вызывает в

[5] Цит. по кн.: С. И. Вавилов. Исаак Ньютон, стр. 47.

нашей душе представление цветов; я не хочу здесь смешивать домыслов с достоверностью» [6].

Заключительная фраза представляет собой первый вариант «Hypotheses non fingo», которым заканчиваются «Математические начала натуральной философии». В «Новой теории света и цветов» отказ от гипотез дан в сравнительно мягкой форме. Однозначная, полная, вполне достоверная теория света с большим трудом могла быть получена в качестве наглядной физической теории. Между тем Ньютон стремится к абсолютной достоверности. Он еще не изгоняет кинетических гипотез из физики, но уже говорит о строгом разграничении физики принципов и физики моделей.

Теория света Ньютона исходит из существования мельчайших корпускул, которые дают на сетчатке глаза ощущения света. Наиболее крупные частицы дают красный цвет, а наименьшие — фиолетовый. Законы оптики выводятся из взаимодействия между частицами материи и световыми корпускулами. Переходя из одной среды в другую, частицы света отклоняются в силу притяжения: мельчайшие фиолетовые — в большей степени, а крупные красные — в меньшей.

Нужно заметить, что и в теории света Ньютон в течение своей жизни высказывал различные гипотезы. Среди них были представления о свете как о колебаниях эфира.

В 1672 г. Гук высказал ряд критических замечаний, направленных против вышедшей незадолго до этого «Теории света и цветов» Ньютона. Ньютон ответил Гуку небольшим трактатом, в котором сопоставляется волновая теория света с теорией истечения световых частиц. В полемике с Гуком Ньютон набросал некоторые черты компромиссной теории, соединяющей волновые и корпускулярные представления. Прежде всего он указывает, что теория световых корпускул ни в коем случае не должна однозначно соединяться с найденным им законом распространения, преломления и отражения света. Однако даже эта теория, судьба которой вовсе не связана с судьбой однозначных и достоверных оптических законов, отнюдь не исключает волновых представлений. Колебания эфира, говорит Ньютон, необходимы, чтобы объяснять оптические явления даже при допущении световых корпускул. Кор-

[6] Там же.

пускулы света, попадая на преломляющие или отражающие поверхности, вызывают колебания эфира, как камень, брошенный в воду, вызывает волны на ее поверхности. Волны эфира могут иметь различные длины, и тогда они позволяют объяснить многие оптические явления.

В дальнейшем Ньютон продолжал развивать представление об истечении частиц, вызывающих волны в эфире. В упомянутой выше статье 1675 г. он говорил, что в безвоздушном пространстве остается некоторая материальная среда — эфир, чрезвычайно разреженный, тонкий и упругий. Эфир объясняет разнообразные физические явления — магнитные, электрические и даже тяготение. Ньютон в чисто картезианском духе описывает различные тончайшие флюиды, из которых состоит эфир.

Электрическое притяжение и отталкивание объясняется выделением тонкого флюида при трении. Указанный флюид, распространяясь вокруг натертого стекла, циркулирует в различных направлениях и увлекает за собой легкие тела, возвращаясь в конце концов обратно в стекло и здесь сгущаясь. Тяготение тел к Земле объясняется движением другой компоненты эфира. Гравитационный флюид приливает к поверхности пор вещества. Земля впитывает эфир и сгущает его в своих порах. Поэтому эфир стремится к Земле и увлекает за собой тело. Он давит на это тело пропорционально поверхности частиц. В недрах Земли происходят сложные реакции, превращающие эфир в обычное вещество и, в свою очередь, вырабатывающие эфир из других веществ. Распространение света связано с колебаниями эфира. Ньютон предполагает, что волны эфира имеют величину, меньшую, чем стотысячная доля дюйма. Эфир входит в тело таким образом, что плотность его в глубине тел меньше, чем на их поверхности. Свет нагревает эфир в телах, а эфир давит на свет, и световые лучи отступают от более плотного эфира к более разреженному. Этим объясняется преломление света и полное внутреннее отражение его при переходе из менее плотной среды в более плотную. Подобными же гипотетическими моделями Ньютон объясняет обычное отражение света, цвета тонких пленок и т. д. Колебания эфира поддерживают движение частиц при брожении, гниении и горении веществ. Для того чтобы сжать свои мышцы, человек сжимает проникающий в них эфир. В этом процессе участвует еще один ингредиент эфира — «животный флюид».

По мере того как Ньютон все глубже разрабатывал идею всемирного тяготения, произвольные модели эфира все меньше соответствовали характеру его творчества. Оптические законы «Начал» выводятся из динамических понятий. В первом издании «Начал» эфир почти не упоминается, а во втором издании о нем говорится лишь как о гипотетическом построении, которое может объяснить сцепление тел, электрические явления, отражение и преломление света, физиологические рефлексы. В 1705 г. в латинском переводе «Оптики» Ньютон поместил дополнительный параграф, посвященный опровержению волновой теории света и идеи эфира, заполняющего межзвездные пространства. В особенно категорической форме Ньютон отвергает представление о материальном эфире как о причине тяготения. По мнению Ньютона, физики должны пользоваться индуктивно найденными законами, которые в конце концов приводят к определению причин. «Между тем главная особенность натуральной философии — делать заключения из явлений, не измышляя гипотез, и выводить причины из действий до тех пор, пока мы не придем к самой первой причине, конечно не механической». Эта первая причина — божество. С. И. Вавилов цитирует выдержки из записок Грегори, где приводится разговор с Ньютоном в декабре 1705 г., как раз в то время, когда Ньютон написал упомянутое добавление к латинскому изданию «Оптики».

«Сэр Исаак Ньютон был со мной и сказал, что он приготовил семь страниц добавлений к своей книге о свете и цветах в новом латинском издании; посредством „вопросов“ он объяснил взрыв пороха и главные химические действия. Он показал, что свет не есть передача движения или давления. Он склоняется к тому, что свет состоит из маленьких телец. Он объяснил в „вопросах“ двойное преломление исландского шпата. У него были сомнения, может ли он выразить последний вопрос так: чем наполнено пространство, свободное от тел? Полная истина в том, что он верит в вездесущее божество в буквальном смысле. Так, как мы чувствуем предметы, когда изображения их доходят до мозга, так и бог должен чувствовать всякую вещь, всегда присутствуя при ней. Он полагает, что бог присутствует в пространстве как свободном от тел, так и там, где тела присутствуют. Но, считая, что такая формулировка слишком резка, он думает написать так: какую причину

тяготению приписывали древние? Он думает, что древние считали причиной бога, а не какое-либо тело, ибо всякое тело само уже тяжелое»[7].

Во втором английском издании «Оптики» (1717 г.) Ньютон снова говорит о физической субстанции, заполняющей пустое пространство. Характерно, однако, что в этом издании наряду с дополнительными параграфами («вопросами»), где Ньютон допускает существование эфира, сохранены параграфы, содержавшиеся в первом издании (1704 г.), где существование эфира отрицается. В третьем и четвертом английских изданиях «Оптики» (1721 и 1730 гг.), отредактированных самим Ньютоном, помещены в первую очередь параграфы 1704 г., где оптические законы выводятся без гипотезы об эфире, затем параграфы, допускающие существование эфира, далее существование эфира опровергается и, наконец, оптика трактуется с динамической точки зрения.

По-видимому, Ньютон в течение всей своей жизни чувствовал, что без кинетических моделей эфира нельзя предметно мыслить о свете, электричестве и тяготении, но в то же время остерегался связывать с гипотезой эфира свои механические и оптические законы, которые представлялись абсолютными, бесспорными и непосредственно вытекающими из чистого опыта. «Математические начала натуральной философии» заканчиваются следующим абзацем: «Теперь следовало бы кое-что добавить о некотором тончайшем эфире, проникающем все сплошные тела и в них содержащемся, коего силою и действиями частицы *тел при весьма малых расстояниях взаимно притягиваются*, а при соприкосновении сцепляются, наэлектризованные тела действуют на большие расстояния, как отталкивая, так и притягивая близкие малые тела, свет испускается, отражается, преломляется, уклоняется и нагревает тела, возбуждается всякое чувствование, заставляющее члены животных двигаться по желанию, передаваясь именно колебаниями этого эфира от внешних органов чувств мозгу и от мозга мускулам. Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны»[8].

[7] Сб. «Исаак Ньютон». М.—Л., 1943, стр. 46.

[8] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 592.

Этот абзац идет непосредственно после декларации «Hypotheses non fingo». И сразу же после такого заявления Ньютон выдвигает ряд физических гипотез, причем по духу — картезианских. Эфир объясняет сцепление, электрические, магнитные, оптические и физиологические явления вплоть до физиологических рефлексов. Но Ньютон, в отличие от Декарта, не развивает гипотезу эфира, не имея возможности установить точные законы его действия. Гипотезы становятся на место: они имеют научную ценность, когда на их основе могут быть сформулированы точные и строгие законы, согласующиеся с величинами, полученными при помощи эксперимента. Однако не нужно думать, что такое рациональное отношение к гипотезам в столь простой форме входило в мировоззрение Ньютона. Нет, Ньютон был твердо убежден лишь в безупречной строгости законов; гипотезам и моделям он отводил иногда чисто дидактическую роль, иногда склонялся к физическому пониманию эфира, а иногда приписывал распространение света и тяготения нематериальному агенту. Таким образом, отношение Ньютона к проблеме эфира и пустоты было достаточно противоречивым.

Под влиянием весьма различных мотивов в физике Ньютона и в физических предпосылках его механики идея пустого пространства играла более важную роль, чем противоположная идея — материальной среды, передающей взаимодействие тел.

В работе по оптике и вообще в исследованиях, связанных с экспериментами, Ньютон зачастую возвращается к представлению об эфире, но в математических, механических и астрономических построениях пространство трактуется как пустота. Что же касается философских и теологических высказываний Ньютона, то здесь речь идет о непосредственном вмешательстве бога в ход физических процессов. Ученики Ньютона шли гораздо дальше, чем он сам. Однако попытка приписать теологические идеи только Котсу и другим богословам, ученикам и комментаторам Ньютона была бы неправильной.

Идея дальнодействия связана с методом Ньютона. В его механике идея взаимной связи предметов природы приобрела исторически ограниченную абстрактную форму взаимодействия двух тел, вырванных из общей связи. Действие тел друг на друга сообщает им ускорения. Поэтому центральным понятием оказывается сопротивле-

ние ускорению — масса — и пропорциональная ей причина ускорения — сила. Весь математический и механический аппарат «Начал» приспособлен к анализу сил тяготения без учета среды.

Принцип действия на расстоянии вошел в естествознание вместе с механикой Ньютона. Однако сам Ньютон не был безусловным сторонником этого принципа. Неоднократно, особенно в письмах, он отвергал дальнодействие. Широко известно его третье письмо к Бентли, где Ньютон в резкой форме отказывается от признания действия на расстоянии: «Нельзя представить себе,— писал он,— каким образом неодушевленное грубое вещество могло бы без посредства чего-либо постороннего, которое нематериально, действовать на другое вещество иначе, как при взаимном прикосновении. А так должно было быть, если бы тяготение было, в смысле Эпикура, присуще материи. Вот почему я желал бы, чтобы вы не приписывали мне учения о тяжести, прирожденной материи. Допустить, что тяготение врожденно материи, присуще ей, так что одно тело должно действовать на расстоянии через пустоту на другое без посредства чего-либо постороннего, помощью которого действие и сила от одного тела проводится к другому, есть для меня такая нелепость, что, полагаю, в нее не впадает ни один человек, способный к мышлению о философских вещах. Тяготение должно вызываться некоторым фактором, действующим согласно определенным законам».

Ряд противников идеи дальнодействия, ссылаясь на это письмо, приписывал Ньютону мысль о материальной среде, которая является причиной тяготения. Так поступали Фарадей, Максвелл, Томсон и многие другие. Но продолжением приведенного отрывка служит фраза: «Какой это фактор, материальный или нематериальный,— я представляю размышлению моих читателей». Именно эти слова о «нематериальном факторе» Фарадей, излагая взгляды Ньютона, отбрасывает, по собственному признанию, «как непонятные». Действительно, они непонятны без исторического анализа различных идейных корней в творчестве Ньютона, различных влияний, противоречивых тенденций и его собственных колебаний между исключающими друг друга концепциями.

Мы видим, что сложные и часто противоречивые идеи Ньютона относительно эфира и пустоты приводят его в

конце концов к практическому исключению эфира из однозначной научной картины мира. Эфир фигурирует в качестве дидактической гипотезы; пустота заполнена агентом, который иногда похож на эфир, а чаще на нематериальную субстанцию, но туда, где царствуют законы, входит лишь противоположность между пустотой и движущимися в ней материальными телами. У Декарта картина мира была лишена объективных качественных различий, у Ньютона есть таковое, но только одно: различие между пространством и материей.

Первоначальные воззрения Ньютона на строение вещества и природу химических реакций можно было бы назвать эфирно-кинетическими. Воззрения позднейшего периода, напротив, динамические, основанные на идее тяготения, действующего через пустоту.

Эти колебания и противоречия в вопросе об эфире несовместимы с образом Ньютона, формулирующего законы природы в окончательном виде, и с представлением о «Началах», как о неких новых скрижалях завета. Подобный образ сохранялся в сознании ученых, пока физика XX в. не низвела систему Ньютона с пьедестала абсолютной непогрешимости на уровень аппроксимации. Но только сейчас можно полностью оценить «неклассического» Ньютона: поколение, прошедшее через горнило антидогматических обобщений теории относительности и квантовой механики, подходит с бо́льшим, чем раньше, интересом и пониманием к нестрогому, часто интуитивному подтексту и противоречивым собственно физическим истокам «Математических начал натуральной философии».

### 3. Учение о пространстве и движении

Исходное определение «Математических начал натуральной философии» — определение массы как количества материи. «*Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее*» [9].

Понятие массы не могло стать основой механики, физики и впоследствии химии, если бы оно не приобрело количественной определенности и масса не оказалась

[9] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 22.

пропорциональной весу. «Определяется масса по весу тела, ибо она пропорциональна весу, что мною найдено опытами над маятниками, произведенными точнейшим образом, как о том сказано ниже» [10].

Историческое значение констатации пропорциональности между весом и массой чрезвычайно велико. Она была и остается основой теории тяготения. Физика и химия также получили в этой констатации основу дальнейшего развития. Поскольку вес пропорционален количеству материи, открывается широчайшая возможность количественного эксперимента в области теории вещества. Далее, количественная определенность всех понятий, связанных с весом, открывает дорогу положительной математической разработке экспериментального естествознания. И, наконец, в картине мира, где материя измеряется массой, а вес пропорционален массе, не остается места для невесомых флюидов, вернее, они оказываются чужеродным понятием в естествознании, развивающемся на основе механики Ньютона. Таким образом, некоторые характерные черты естествознания XVII—XVIII вв. уже содержатся в первом определении «Начал». Вместе с тем определение Ньютона обобщило и систематизировало некоторые тенденции, уже наметившиеся в естествознании XVII в. Напомним, что эксперименты, из которых вытекала пропорциональность массы и веса, были проведены Галилеем в самом начале века.

Вслед за материей Ньютон определяет с количественной стороны движение: *«Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе»* [11]. Именно количественная сторона и интересует Ньютона. Движение для него с самого начала — величина, нечто подлежащее измерению. В пояснении оно сразу фигурирует как количество: движение целого есть сумма движений в отдельных частях. Исторически это понятие примыкает, конечно, к картезианскому пониманию количества движения.

В третьем определении Ньютон говорит: *«Врожденная сила материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно*

---

[10] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 22.

[11] Там же, стр. 23.

*предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения*» [12]. Следует подчеркнуть, что эта формулировка вовсе не совпадает с принципом инерции, в частности с первым ньютоновским законом движения. Здесь речь идет не о движении, а о материи, о ее природе и ее неотъемлемом динамическом свойстве. Инерция в смысле сохранения скорости прямолинейного равномерного движения была достаточно четко сформулирована до Ньютона. Здесь подчеркивается другая сторона дела: способность сопротивления есть врожденное свойство тела не только сохранять, но и удерживать свое состояние. Если первоначально инерция была отрицательной характеристикой движения (прямолинейное и равномерное движение само собой не прекращается), то у Гюйгенса и в особенности у Лейбница она стала положительной характеристикой материи (материи по ее природе присуще активное сопротивление толчку, активная сила материи позволяет одному телу действовать на другое). Ньютон развивает эту динамическую концепцию, отличающуюся от картезианской и резко подчеркивает своей терминологией упорство в удержании состояния («perseverare in statu quo» [13]).

Далее даны определения, относящиеся к понятию силы, после чего идет «Поучение», в котором Ньютон счел необходимым ввести понятие абсолютного пространства.

По определению Ньютона «*абсолютное пространство* по самой сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным. *Относительное* есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел, и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное...» [14].

Часть пространства, занятая телом, называется местом этого тела. В зависимости от того, какое пространство имеется в виду, различают абсолютные и относительные места тела.

Абсолютное движение определяется как перемещение тела из одного абсолютного места в другое, относительное

---

[12] Там же.
[13] Там же, стр. 25 (Примечание 7).
[14] Там же, стр. 31.

же движение — как перемещение тела из одного относительного места в другое относительное место. Таким образом, абсолютное движение есть движение в абсолютном, а относительное движение — в относительном пространстве.

Ньютон приводит пример корабля. Относительное место груза есть часть корабля, в которой груз расположен. Если груз не меняет своего положения на корабле, то о нем говорят, что он находится в относительном покое. «Истинный покой есть пребывание тела в той же самой части того неподвижного пространства, в котором движется корабль со всем в нем находящимся» [15].

В природе, по словам Ньютона, может вовсе не существовать равномерного движения, которое служило бы естественной мерой абсолютного течения времени. Независимо от природных процессов абсолютное время движется неизменно. Абсолютное время существования предмета не меняется в зависимости от скорости движений. Напротив, относительное время, которое является предметом наблюдения, зависит от скорости реальных процессов. Поэтому, говорит Ньютон, истинная длительность отличается от непосредственно наблюдаемой.

Ньютон доказывает, что непосредственное наблюдение ни при каких условиях не может установить различия между отдельными частями абсолютного пространства и абсолютного времени. Восприятию доступны лишь относительные положения предметов, т. е. расстояния их от других тел, принимаемых за неподвижные. Тем не менее Ньютон вводит убедительный, по его мнению, критерий разграничения абсолютных и относительных движений. Этот критерий — динамический. Понятие абсолютного пространства, фигурировавшее у Аристотеля, уже не находит места в механике. Ньютон систематизировал и завершил начатое Коперником и Галилеем разрушение аристотелевской системы естественных мест, на которые натянуто абсолютное пространство. Отныне это понятие теряет непосредственный, наглядный кинематический смысл. Нельзя определить «абсолютное место», т. е. место тела в абсолютном пространстве, по его положению относительно абсолютно неподвижной Земли. Нельзя уже определить аб-

---

[15] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 31.

солютное движение по абсолютному пространству. Наоборот, теперь понятие «абсолютное пространство» приобретает смысл только потому, что наблюдения могут зарегистрировать абсолютное движение. Последнее, по мнению Ньютона, регистрируется появлением сил инерции при ускорении. Таким образом, вместо абсолютно неподвижных тел отсчета, вместо кинематически наглядного абсолютного пространства Ньютон вводит локальный критерий: поведение тела в данной точке при ускорении отличается от поведения неподвижного или равномерно движущегося тела.

Такой новый критерий означал не только новую концепцию абсолютного пространства и абсолютного движения. Он был первой количественно определенной формой *дифференциального мировоззрения*, о котором упоминалось при изложении галилеевой концепции круговых инерционных движений. Напомним еще раз, что у Аристотеля движения тел сами по себе не создавали схемы мировой гармонии, они вызывались, вообще говоря, действием некоторого агента и без него прекращались. Напротив, у Галилея, исходная схема упорядоченного мира — кинематическая схема движений предоставленных себе сил. Они и создают «пребывающее бытие», а изменения в мире состоят в последнем счете из ускорений. У Аристотеля изменения в природе вызываются отклонениями или состоят в отклонениях от мировой интегральной статической схемы, от упорядоченной дислокации тел, при которой они находятся на своих естественных местах. У Галилея, а в четкой количественной форме у Ньютона для регистрации изменений нет надобности ссылаться на мировую интегральную схему. Изменения проявляются в точке и в мгновение локальным образом. Поэтому траектория тела не только геометрически, но физически состоит из отдельных точек, а время движения — из отдельных мгновений. Мы должны описывать движение такими математическими приемами, которые в принципе позволяют проследить движение частицы от точки к точке и от мгновения к мгновению. Здесь исходный пункт такого представления о процессах природы, которое позволяет их описывать дифференциальными уравнениями.

Локальный характер ускорения позволяет говорить о его абсолютном характере. В системе, движущейся с ускорением, возникают силы инерции. Если другие тела дви-

жутся с ускорением относительно данного, в нем не возникают силы инерции. Поэтому констатация ускорения не требует указания на тело отсчета, ускорение имеет абсолютный характер. Но если переход тела из одного места в другое имеет в случае ускоренного движения абсолютный смысл, значит эти места являются частями абсолютного пространства.

«*Проявления*, которыми различаются абсолютное и относительное движения, *состоят в силах стремления удалиться от оси вращательного движения*, ибо в чисто относительном вращательном движении эти силы равны нулю, в истинном же и абсолютном они больше или меньше, сообразно количеству движения» [16].

Далее идет знаменитый пример вращающегося сосуда с водой.

«Если на длинной нити подвесить сосуд и, вращая его, закрутить нить, пока она не станет совсем жесткой, затем наполнить сосуд водой и, удержав сперва вместе с водою в покое, пустить, то под действием появляющейся силы сосуд начнет вращаться и это вращение будет поддерживаться достаточно долго раскручиванием нити. Сперва поверхность воды будет оставаться плоской, как было до движения сосуда. Затем сосуд силою, постепенно действующею на воду, заставит и ее участвовать в своем вращении. По мере возрастания вращения вода будет постепенно отступать от середины сосуда и возвышаться по краям его, принимая впалую форму поверхности (я сам это пробовал делать); при усиливающемся движении она все более и более будет подниматься к краям, пока не станет обращаться в одинаковое время с сосудом и придет по отношению к сосуду в относительный покой. Этот подъем воды указывает на стремление ее частиц удалиться от оси вращения, и по этому стремлению обнаруживается и измеряется истинное абсолютное вращательное движение воды, которое, как видно, во всем совершенно противоположно относительному движению. Вначале, когда относительное движение воды в сосуде было наибольшее, оно совершенно не вызывало стремления удалиться от оси — вода не стремилась к окружности и не повышалась у стенок сосуда, а ее поверхность оставалась плоской и истинное вращательное ее

[16] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 33.

движение еще не началось. Затем, когда относительное движение уменьшилось повышение ее у стенок сосуда обнаруживало ее стремление удалиться от оси, и это стремление показывало ее постепенно возрастающее истинное вращательное движение, и когда оно стало наибольшим, то вода установилась в покое относительно сосуда. Таким образом, это стремление не зависит от движения воды относительно окружающего тела, следовательно, по таким движениям нельзя определить истинного вращательного движения тела. Истинное круговое движение какого-либо тела может быть лишь одно в полном соответствии с силою стремления его от оси, относительных же движений в зависимости от того, к чему они относятся, тело может иметь бесчисленное множество; но независимо от этих отношений эти движения совершенно не сопровождаются истинными проявлениями, если только это тело не обладает, кроме этих относительных, и указанным единственным истинным движением» [17].

Пример этот направлен против картезианского релятивизма, но, конечно, дело не сводится к полемике. Ньютон хочет показать, что истинное движение отнюдь не должно относиться к соседним телам. Когда вода с наибольшей скоростью движется относительно стенок сосуда, центробежная сила не появляется. Напротив, когда вода не движется относительно сосуда, ее края поднимаются. Соответственно центробежная сила доказывает, что движение планет имеет абсолютный характер. Из ньютоновского тезиса о проявлениях абсолютного движения прямо вытекает, что движение планет по криволинейным орбитам есть абсолютное движение, так как планеты испытывают стремление удалиться от центра орбиты.

На основе подобных конкретных астрономических и механических наблюдений Ньютон мог отказаться от объяснения центробежных сил действием каких-либо конкретных материальных масс. Этот отрицательный вывод был исторически правомерным и отражал уровень действительных естественнонаучных знаний XVII в. Из всей совокупности явлений, известных науке в XVII—XIX вв., вытекало утверждение, что причиной центробежных сил служит вращение, которое нельзя отнести к какому-нибудь кон-

---

[17] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 33—34.

кретному физическому телу. Поэтому Ньютон отнес вращение к самому пространству.

Что означает такая концепция с точки зрения основной проблемы механической картины мира, проблемы дискретных тел и среды, в которой они движутся?

Если пространство является лишь геометрическим, физически нейтральным фоном в картине движущихся тел, то последовательное представление о каузальной связи процессов природы не может ссылаться на пространство и положение тел в пространстве при объяснении их поведения. Идеалом науки будет концепция природы, объясняющая всю совокупность явлений только движениями и взаимодействиями тел.

Мы впоследствии вернемся к этому *классическому идеалу науки.*

С точки зрения такого идеала силы инерции должны быть объяснены взаимодействием тел, а не отношением тел к пространству. Подобный принцип был исходным принципом критики ньютонова абсолютного пространства. В частности, Мах в своей «Механике» критиковал ньютоново определение абсолютного пространства и абсолютного движения и объяснение центробежных сил и вообще сил инерции ускорением тела, отнесенным к пустому пространству. Эйнштейн назвал «принципом Маха» принцип, согласно которому все в природе, включая силы инерции, зависит только от взаимных движений и взаимодействий масс.

Вернемся к изложению «Начал». «Поучение», помещенное в конце первой главы, возвещает программу книги: нахождение движений по вызывающим их причинам и, наоборот, нахождение сил по движениям. Реализация этой программы начинается в следующей главе — «Аксиомы или законы движения». Они не повторяют ранее данных определений. Ньютоновские законы движения — это аксиомы, однозначно связывающие между собой измеримые величины, причем величины, физически не тождественные. В определениях, напротив, даны лишь количественные характеристики материи, движения, инерции, силы, пространства и времени. Эти характеристики представляют собой абстрактные определения, взятые из наблюдения действительности и служащие предпосылкой научного анализа действительности.

Первый закон движения гласит: «*Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномер-*

*ного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние»* [18].

Этот закон не является по форме уравнением, связывающим наблюдаемые величины. Однако он сводится именно к такому уравнению, если его рассматривать как частный случай второго закона — закона пропорциональности между силой и ускорением. С этой точки зрения первый закон Ньютона сводится к утверждению, что нулевая сила соответствует нулевому ускорению. В отличие от третьего определения, говорящего об инерции как врожденной силе материи, в первом законе изложена не положительная характеристика материи, а отрицательная характеристика движения. Закон инерции выступает здесь как частный (нулевой) случай закона пропорциональности между силой и инерцией, и инерция есть частный случай ускорения. Ньютон не изменяет своему методу: он исходит из абстрактного отрицательного понятия, чтобы затем перейти к положительному. Именно поэтому закон инерции предшествует закону пропорциональности между силой и ускорением. Если в третьем определении «Начал» инерция трактовалась как исходное существенное свойство материи, то здесь подчеркивается условный характер инерции, абстрактное, условное устранение силы из картины движения. В пояснении к первому закону это выражено еще ярче. Здесь приводится пример брошенного тела, волчка и планет, которые сохраняют скорость, поскольку этому не мешает приложение силы. В первом законе инерционное движение составляет одну сторону, одну компоненту реального движения, которое всегда включает и другую сторону, другую компоненту — ускорение. Мы приходим к инерции, устраняя ускорения, сводя их к нулю. Это может быть реальным процессом, если мы действительно в эксперименте или в производственной технике устраняем трение, сопротивление воздуха и т. д. Такого реального (разумеется, неполного) устранения достигала экспериментальная техника в ряде опытов, доказывающих основные законы механики.

К ускорению относится второй закон движения. «*Изменение количества движения пропорционально приложен-*

[18] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 36.

*ной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует»* [19].

В современной механике «приложенной действующей силе» соответствует просто *сила.* Изменение количества движения пропорционально этой величине. Здесь Ньютон не пользуется еще понятием ускорения. Вместо этого он говорит о количестве движения, предполагая, что сила действует в течение некоторого определенного промежутка времени. Впоследствии, познакомив читателя с принципами исчисления бесконечно малых, Ньютон доказывает, что при самом начале движения, вызванного любой постоянной или переменной силой, пройденный путь пропорционален квадрату времени. Следовательно, на основании законов равноускоренного движения скорость, произведенная силой, действующей «при самом начале движения», пропорциональна времени, а так как масса тела неизменна, то и количество движения изменяется пропорционально времени. Это значит, что в бесконечно малые промежутки времени приращения скорости и количества движения пропорциональны времени. Скорость есть предел отношения пройденного пути ко времени, когда время и пройденный путь становятся бесконечно малыми. Предел отношения приращения скорости ко времени, в течение которого действует сила, пропорционален изменению количества движения. Эта современная формулировка второго закона Ньютона была дана только в начале XIX в. Пуассоном.

Третий закон: *«Действию всегда противостоит равное и противоположное ему противодействие, иначе говоря, действия тел друг на друга равнопротивоположны».* Ньютон иллюстрирует этот закон рядом примеров. Если нажимать пальцем на камень, то камень, в свою очередь, нажимает на палец с той же силой. Если лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и сама она испытывает притяжение к камню через канат, причем упругость каната действует одинаково в обоих направлениях. При ударе двух тел оба претерпевают одинаковые изменения в количестве движения, эти изменения направлены в противоположные стороны, и ввиду неизменности масс изменения скоростей обратно пропорциональны массам тел. Третий закон, как

---

[19] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 37.

говорит Ньютон, относится не только к толчкам, но и к *притяжению*.

С точки зрения Ньютона, действие и противодействие можно рассматривать и как силу, приложенную к телу, и как силу инерции этого тела. Если тело *A* толкает тело *B*, то для *B* воздействие со стороны *A* является приложенной силой, а инерция — фиктивной силой, которая как бы сопротивляется этому воздействию. Сила инерции *B* для *A* является реальной приложенной силой. Если посмотреть внимательно на различие между этими двумя силами, реальной и фиктивной, то мы увидим, что они могут поменяться местами при перемене системы отсчета. Реальная сила, приложенная к телу, вызывает ускорение, фиктивная сила не приложена к телу и не вызывает ускорения этого тела. Следовательно, различие между реальной и фиктивной силой относительно, оно зависит от того, какое тело мы рассматриваем, которому из двух взаимно движущихся тел мы приписываем истинное движение, с каким телом неподвижно связана система отсчета.

Из свойственного ньютоновой механике представления об относительности действия и противодействия был сделан ряд выводов. В частности, принцип д'Аламбера основан на эквивалентности и взаимности реальных и фиктивных сил, на том простом факте, что каждая сила может рассматриваться как реальная, если она приложена к данному телу, и что фиктивная сила станет реальной, а реальная — фиктивной, как только мы перенесем начало координат с одного тела на другое и начнем рассматривать тело, считавшееся неподвижным, как движущееся. Поэтому мы можем, включив в уравнение фиктивные силы и приравняв их к реальным, исключить движение тела, свести динамическую задачу к статической.

Согласно второму закону Ньютона, сила вызывает пропорциональное ей ускорение. Если силы действуют на тело с разных сторон и их геометрическая сумма равна нулю, то тело остается в покое или движется прямолинейно и равномерно. Если же геометрическая сумма приложенных сил дает равнодействующую, не равную нулю, то эта равнодействующая будет равна отличному от нуля произведению массы на ускорение. Мы можем поэтому сказать, что сила, действующая на движущееся тело, и произведение массы на ускорение, взятое с обратным знаком, в сумме

равны нулю. Второй член (произведение массы на ускорение, взятое с обратным знаком) может быть приравнен силе инерции: она соответствует инертной массе, проявляется пропорционально приложенной силе и действует в обратном направлении, поэтому и берется с обратным знаком. Это фиктивная сила, так как она не приложена к движущемуся телу. Если рассматривать ее как реальную силу, то все силы уравновешиваются, и тело не движется с ускорением. Поэтому динамическая задача может свестись к статической, если к действующим силам прибавить силы инерции.

Сформулировав закон равенства действия и противодействия, Ньютон переходит к следствиям из трех законов движения.

В пятом следствии Ньютон формулирует принцип относительности прямолинейного и равномерного движения. *«Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения»* [20]. Это следствие законов движения доказывается неизменностью суммы и разности движений тел в инерциальной системе. Тела действуют друг на друга пропорционально разности движений, когда одно тело догоняет другое, и пропорционально сумме движений, когда тела встречаются. Если система движется, то ее движение прибавляется к одному слагаемому и отнимается от другого (когда тела встречаются) или прибавляется и к уменьшаемому и к вычитаемому (когда одно тело догоняет другое, и движение вычитается).

«Так как разности движений,— поясняет Ньютон,— направленных в ту же сторону, и суммы направленных в стороны противоположные одинаковы в обоих случаях (как это следует из условий), все же усилия, с которыми тела действуют друг на друга при столкновениях, зависят лишь от этих разностей или сумм, то по второму закону последствия столкновений будут равные в обоих случаях, и, следовательно, относительные движения останутся в обоих случаях одинаковыми. Это подтверждается обильно опытами. Все движения на корабле совершаются одинаково, находится ли он в покое или движется равномерно и прямоли-

[20] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 45.

нейно»[21]. Таким образом, доказательство опирается на правило сложения скоростей.

Принцип относительности Ньютон изложил, исходя из представления об абсолютном пространстве. Если отказаться от этого понятия, то прямолинейное движение координатных систем теряет определенный смысл, так же как и покой, и, чтобы высказать принцип относительности, надо исходить из понятия инерции. Исходным понятием становится инерциальная система, т. е. такая система координат, в которой тело, предоставленное самому себе, движется прямолинейно и равномерно. Такие системы в современной механике называются также галилеевскими. Принцип относительности классической механики состоит в утверждении, что законы механики остаются справедливыми для бесконечного числа различных инерциальных систем, которые движутся прямолинейно и равномерно относительно друг друга. В равноправности всех систем и состоит ньютоновский принцип относительности.

Что означает неизменность законов механики для всех инерциальных систем? Законы механики говорят об ускорениях, пропорциональных силам, что же касается скоростей движущихся тел, то они, разумеется, различны в зависимости от того, к каким координатам относить движение тел. Можно вычислить скорость движущегося тела и его координаты в каждый момент времени в некоторой инерциальной системе, если знать скорости и координаты в другой инерциальной системе. Некоторые величины при этом не меняются. Если мы имеем два тела, сохраняющие одинаковое расстояние между собой, то разница между их координатами не зависит от того, в какой координатной системе мы рассматриваем эти тела. Подобная величина называется инвариантной относительно перехода от одной системы координат к другой. В случае поворота координатных систем инвариантным оказывается расстояние тела от начала координат. В случае, если одна система движется относительно другой прямолинейно и равномерно со скоростью $v$, мы можем направить координатные оси в каждой системе таким образом, чтобы в обеих системах, например, оси $X$ совпадали; тогда мы приходим к двум координатным системам, из которых одна движется по отношению к другой по оси $X$. Чему будут равны координаты

[21] Там же, стр. 45—46.

движущихся тел, если их относить не к первой системе, а ко второй, движущейся по отношению к первой со скоростью $v$? За время $t$ вторая система координат переместится по сравнению с первой вдоль оси $X$ на расстояние, равное скорости $v$, помноженной на время $t$. Координаты $y$ и $z$ не изменятся в результате переноса, а координата $x$ в новой системе будет меньше, чем в старой, на величину переноса, т. е. на $vt$. Таким образом, обозначив координаты во второй системе через $x'$, $y'$ и $z'$, мы получим уравнения преобразования при переходе от одной координатной системы к другой:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z.$$

Эти преобразования называются преобразованиями Галилея.

Теперь можно сформулировать принцип относительности классической механики в следующей форме: законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея.

## 4. Закон всемирного тяготения

В XVIII—XIX вв. в развитии науки основную роль играли позитивные результаты, к которым Ньютон пришел в «Началах». Они выполняли роль аксиом, из которых при помощи математических, главным образом аналитических, методов получались новые выводы. В XX в. для развития науки наибольшее значение имела критика некоторых исходных понятий ньютоновой механики.

С одним из них мы познакомились — это понятие абсолютного пространства, выводимое из сил инерции, демонстрирующих абсолютный характер ускоренного движения. Другое понятие — абсолютное время.

Ньютон разграничивает абсолютное время, которое не зависит от событий, и относительное время — «постигаемую чувствами внешнюю, совершаемую при посредстве какого-либо движения, меру продолжительности...» [22]. Последующее развитие механики конкретизировало определение абсолютного времени. Оно отличается от определения абсолютного пространства. Абсолютное пространст-

[22] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 30.

во — это пространство, не отнесенное к телу отсчета. Положение в абсолютном пространстве, абсолютное место тела, определяется не его расстоянием от тела отсчета, а динамическим эффектом при ускоренном движении из данного места в иное. Только такое понятие абсолютного пространства может существовать, если пространство признано однородным. Можно было думать, что абсолютное время — это время, не отнесенное к конкретному событию, служащему началом отсчёта. Но время уже в древности считалось одородным, поскольку креационистские легенды о сотворении мира и представление об абсолютных циклах бытия не оказывали влияния на положительное содержание естественнонаучных воззрений. Мысль об абсолютном начале времени (до него время не существовало) и абсолютном конце времени (после него время остановится) высказывалась не раз, но она не влияла сколько-нибудь ощутимо на положительные знания. Если нет событий, служащих границами времени, естественным началом отсчета и т. д., то абсолютное время не может иметь смысла, аналогичного тому смыслу, который придавали абсолютному пространству с естественными границами и естественным центром. Уже в древности проблема состояла в ином: время измеряется движением, движение имеет различную скорость, каким же образом можно идентифицировать время, отсчитываемое при помощи одного движения, и время, отсчитываемое при помощи другого движения? Если можно отождествить одно и другое, значит существует единое время, независимое от движений тела, оно существует и длится само по себе. Значит, абсолютное время — это время, не зависящее от того, с какой скоростью движется система, в которой оно измерено.

В механике Ньютона гарантией такой независимости времени от движения, гарантией существования единого времени для всей Вселенной служит мгновенное распространение взаимодействий. Если основа ньютоновой абсолютизации пространства состоит в силах инерции, в возникновении сил, не связанных с взаимодействием тел, то основа ньютоновой абсолютизации времени — это мгновенное действие на расстоянии. Мгновенное распространение взаимодействий — более общая и фундаментальная идея классической физики, чем действие на расстоянии в обычном пространственном смысле, т. е. игнорирование среды, передающей взаимодействие тел. И твердые стержни

Декарта и распространяющиеся через пустоту силы ньютонианцев гарантировали одновременность двух событий: 1) тело $A$, находящееся в точке $a$, действует на другое тело $B$, и 2) тело $B$ в точке $b$ испытывает это воздействие в тот же момент.

Универсальное, мгновенно распространяющееся взаимодействие тел выражается в их тяжести. Стремление тел вверх объясняется лишь относительным, кажущимся отсутствием тяжести, которое сводится к большей тяжести окружающих тел. Из равенства ускорений всех падающих тел, доказанного многочисленными экспериментами, Ньютон выводит, что веса тел, равноотстоящих от центра Земли, относятся как количества материи или массы тел. При одном и том же расстоянии от центра Земли силы, с которыми тела притягивают к себе Землю, соответственно так же пропорциональны массам. Отсюда следует, что сила тяготения, исходящая от тела, складывается из силы тяготения его частей. Поэтому все земные тела притягиваются друг к друг с силой, пропорциональной количеству материи, массе каждого тела.

Установив свойства земного притяжения, Ньютон приходит к определению тяготения в небесном пространстве. Из прямолинейности инерционного движения следует, что к телам, движущимся по кривым линиям, приложены некоторые силы. Планеты, которые непрерывно уклоняются от прямого пути и описывают криволинейные орбиты, постоянно находятся под действием сил. Тело, движущееся по некоторой кривой так, что радиус-вектор описывает площади, пропорциональные времени, находится, как доказывает Ньютон, под действием силы, направленной к центру. Эту силу можно назвать центростремительной по отношению к движущемуся телу или притяжением по отношению к центральному телу. Далее доказывается, что если несколько тел движется так, что квадраты времени обращения пропорциональны кубам расстояний этих тел от общего центра, то силы тяготения, испытываемые телами, обратно пропорциональны квадратам расстояний. Соответственно Ньютон выводит законы Кеплера из силы взаимного тяготения небесных тел. Планеты движутся по своим эллиптическим орбитам благодаря центральной движущей силе, которая направлена к фокусу каждой орбиты. Когда планеты приближаются к центру, эта сила возрастает пропорционально квадрату расстояния, и в такой же сто-

пени сила убывает, когда планета отдаляется от центра обращения. Из этого простого закона легко выводятся все законы Кеплера.

Ход мысли Ньютона в общих чертах можно представить следующей крайне упрощенной схемой. Согласно первому закону Кеплера, орбиты планет эллиптические. В упрощенном случае, когда эксцентриситет равен нулю, они представляются кругами. Тогда из второго закона Кеплера вытекает постоянство скорости движения планеты по круговой орбите. Иначе говоря, планета имеет ускорение, направленное к центру, которое непрерывно меняет направление скорости планеты, удерживая ее на круговой орбите и не давая ей двигаться прямолинейно.

Ньютон устанавливает формулу центростремительного ускорения в первой книге «Начал» (теорема IV). Величина центростремительного ускорения равна квадрату скорости равномерного движения по кругу, деленному на радиус круга. На современном языке эту зависимость можно выразить формулой

$$f = \frac{v^2}{r},$$

где $f$ — центростремительное ускорение, $v$ — скорость движения по кругу, а $r$ — его радиус.

Далее, пользуясь третьим законом Кеплера, можно показать, что центростремительное ускорение целиком зависит от расстояния между планетой и Солнцем. Согласно третьему закону, кубы больших осей эллипсов (а в случае круговых орбит — кубы радиусов) имеют постоянное для всех планет отношение к квадратам времени обращения. Поэтому время обращения, входящее в формулу, можно выразить через радиус, т. е. через расстояние от планеты до Солнца. Если бы, например, у Земли было много спутников, то к ним был бы применим третий закон Кеплера, согласно которому квадраты периодов движений по круговым орбитам пропорциональны кубам радиусов орбит.

Третий закон Кеплера можно выразить формулой

$$\frac{r^3}{t^2} = \frac{1}{c},$$

где $t$ — период обращения по орбите, $r$ — радиус круговой орбиты и $c$ — некоторый коэффициент пропорциональности, постоянный для всех тел, вращающихся вокруг одного

центра. Скорость вращения по кругу равна

$$\frac{2\pi r}{t},$$

т. е. длине окружности, деленной на период обращения; если подставить это значение в формулу, выражающую центростремительное ускорение, причем период движения по орбите выразить через радиус, то мы получим

$$f = \frac{4\pi^2}{cr^2},$$

где ясно видно, что центростремительное ускорение планеты не зависит ни от каких других величин, кроме расстояния между планетой и Солнцем. Центростремительное ускорение обратно пропорционально квадрату расстояния. Сила, служащая причиной центростремительного ускорения планеты, направлена, как и само ускорение, к Солнцу, иначе говоря, эта сила притягивает планету к Солнцу. Она равна ускорению, умноженному на массу. С другой стороны, тяжесть, сообщающая телам направленное к центру Земли равномерное ускорение, также пропорциональна массе. Ньютон предположил, что здесь не аналогия, а тождество. Всю гениальную смелость этой идеи трудно сейчас оценить, настолько глубоко вошел закон всемирного тяготения в науку. Но в XVII в. Ньютону понадобилась вся сила его мысли, чтобы отождествить движение небесных тел с падением грузов на Землю. Это было завершением объединения астрономии земной механики.

Далее Ньютон исследует, подтверждается ли астрономическими наблюдениями обратная пропорциональность между квадратом расстояния и центростремительным ускорением. Он сравнивает два тела. Одно из них небесное тело, которое вращается вокруг Земли по круговой орбите на таком же расстоянии, что и Луна, а другое тело падает на Землю с небольшой высоты. Ньютон сравнивает две величины — отклонение Луны от прямолинейного движения и путь, пройденный падающим телом в течение того же времени. Отклонение Луны от касательной к ее орбите в течение некоторого малого промежутка времени пропорционально центростремительной силе, притягивающей Луну к Земле. Действительное движение Луны складывается из инерционного движения по касательной и ее падения по направлению к Земле, вызываемого центростреми-

тельной силой. Разложив действительное движение Луны на эти компоненты, мы получаем отклонение Луны от касательной. Его легко определить, зная расстояние Луны до центра Земли и время обращения Луны. Такова первая величина. Она соответствует силе притяжения Луны к Земле. Вторую величину — расстояние, которое в тот же краткий промежуток времени проходит на Земле падающее тело благодаря своему весу,— легко найти непосредственными наблюдениями. Сравнивая две величины — отклонение Луны от прямолинейного движения и расстояние, которое проходит в тот же промежуток времени падающее на Землю тело,— Ньютон обнаруживает, что отношение между указанными величинами равно отношению квадрата радиуса Земли к квадрату радиуса лунной орбиты. Иначе говоря, Луна притягивается к Земле во столько раз слабее, чем земное тело, во сколько квадрат радиуса ее орбиты больше, чем квадрат радиуса Земли. Если принять радиус Земли за единицу, то отношение центростремительных сил Луны и земных предметов оказывается равным квадрату расстояния от Луны до Земли.

Производя вычисления, Ньютон получил для центростремительной силы Луны величину в 3600 раз меньшую, чем сила тяжести на земной поверхности. В то время было известно, что расстояние от центра Земли до Луны равно 60 радиусам Земли. Поэтому, говорит Ньютон, если бы Луна находилась на земной поверхности, то сила притяжения увеличилась бы пропорционально квадрату расстояния, т. е. в $60^2 = 3600$ раз. Если бы Луна катилась прямо по Земле, центростремительная сила, притягивающая Луну к Земле, стала бы равной весу земных предметов. Сила тяготения убывает пропорционально квадрату расстояния; поэтому Луна, приблизившись к земной поверхности, испытывала бы притяжение Земли во столько раз большее, во сколько квадрат радиуса Земли меньше квадрата радиуса лунной орбиты. Таким образом, центростремительная сила, испытываемая Луной, на поверхности Земли была бы равна силе тяжести. Тяготение Луны к Земле, заставляющее Луну описывать криволинейную орбиту, есть земная сила тяжести, распространенная до Луны. Если Луна притягивается к Земле, то Земля с одинаковой силой притягивается к Луне. Приливное движение на земной поверхности связано с притяжением Луны, доходящим до Земли. Из кеплеровых законов обращения планет

вокруг Солнца и обращения спутников вокруг планет вытекает, что центростремительная сила планет направлена к центру Солнца, а центростремительные силы спутников — к центрам планет и что эти силы обратно пропорциональны квадратам расстояния до центров тяготения. Таким образом, движения планет и их спутников также объясняются законом тяготения.

Далее Ньютон разъясняет движение комет. Они приходят из весьма отдаленных областей и движутся вокруг Солнца на сравнительно небольшом расстоянии. Ньютон доказывает, что кометы движутся по коническим сечениям с фокусом в центре Солнца, причем радиусы-векторы, проведенные из центра Солнца к точке, где находятся кометы, описывают площади, пропорциональные времени. Отсюда следует, что сила, удерживающая кометы на их орбитах, также обратно пропорциональна квадрату расстояния от центра Солнца и направлена к этому центру, что и здесь мы встречаемся с той же силой всемирного тяготения.

Ньютон переходит от небесных тел к микромиру и стремится доказать, что мельчайшие частицы вещества также испытывают взаимное тяготение, пропорциональное массам. Он утверждает, что все без исключения тела, от неподвижных звезд до мельчайших частиц, испытывают тяготение, пропорциональное массе и обратно пропорциональное квадрату расстояния.

В мире небесных тел тяготение оказалось относительным и взаимным. Земля уже не может больше рассматриваться как абсолютный центр тяготения. Земля притягивает Луну, но сама притягивается Солнцем, и все это должно быть дополнено обратным влиянием Луны на Землю, Земли на Солнце и т. д. Соответственно выражение для центростремительного ускорения превращается в выражение закона универсального взаимного тяготения

$$F = k\frac{mm'}{r^2},$$

где $k$ — множитель пропорциональности, а $m$ и $m'$ — массы тяготеющих друг к другу тел. Формула всемирного тяготения, положенная в основу небесной механики, означает, что небесные тела рассматриваются во взаимодействии со всеми остальными. Задача двух тел переходит в задачу трех и большего числа тел, и развитие небесной механики приобретает характер последовательного усложнения и

конкретизации первоначальных формул, описывающих взаимное притяжение.

Несколько слов об отношении закона тяготения к воззрениям Галилея. В I главе этой книги было сказано об основном принципе галилеева «Диалога» — принципе космической инерции, о криволинейных инерционных движениях небесных тел в картине мира, нарисованной Галилеем. Галилей, если передать его мысль современными терминами, не отделял инерциии от силового поля, искривляющего движения тел. Некоторая близость такого воззрения к общей теории относительности объясняется, как уже сказано выше, отнюдь не каким-либо предвосхищением современной теории. Первоначальные, независимые, гибкие концепции Галилея были лишены определенности, четкости и вместе с тем «жесткости» позднейших классических определений. Разграничение инерционного, свободного движения и движения в силовом поле — основа всей механики и физики XVIII—XIX вв. — было итогом, а не началом механики XVII в. Такое разграничение опиралось отчасти на «Беседы и математические доказательства».

Теория всемирного тяготения исторически примыкает к высказанной Галилеем в «Беседах» мысли о параболическом движении брошенного тела. У Галилея движение брошенного тела рассматривалось в земных масштабах, Ньютон придал задаче космический масштаб. Космическое движение небесных тел происходит по коническим сечениям по инерции и под воздействием притяжения, направленного к фокусу. Параболическое движение брошенного тела было в сущности частным случаем такого движения. Здесь была налицо инерция первоначального толчка и сила тяготения. Правда, Галилей рассматривал силу тяготения как действующую по параллельным направлениям. Это было связано с земными масштабами механики «Бесед», с представлением о поверхности Земли как горизонтальной поверхности. Разумеется, при переходе к космическим масштабам легко обнаруживалось действительное направление сил тяготения.

Для объяснения законов небесной механики была необходима разработанная Гюйгенсом теория центробежных сил. Гюйгенс создал непосредственные предпосылки для теории Ньютона, однако не для той законченной концепции, которая изложена в «Началах», а для первоначального наброска теории.

В августе 1665 г. в Кембридже временно прекратились занятия, так как в Англии началась эпидемия чумы. Она окончилась в 1667 г. В продолжение этих двух лет Ньютон жил в Вулсторпе. Именно здесь были начаты его наиболее крупные научные работы. Здесь Ньютон впервые пришел к основным идеям своих математических, механических и оптических работ. В Вулсторпе в годы чумы Ньютон задумал работы, посвященные тяготению, дифференциальному исчислению и оптике. Ньютон в эти годы уже пришел к основным идеям всемирного тяготения, исчисления флюксий и теории цветов. Но только через двадцать лет после вулсторпских замыслов появилась теория тяготения, изложенная в «Началах». Эти двадцать лет Ньютон посвятил решению частных проблем, без которых закон всемирного тяготения не мог стать строгим и незыблемым. Необходимо было доказать полное совпадение тяжести и космических центростремительных сил при одних и тех же расстояниях. Далее требовалось распространить выводы, полученные для кругового движения, на эллиптические движения. Наконец, Ньютон должен был перейти от тяготения точек к тяготению тел.

Нельзя думать, что в указанные годы Ньютон искал лишь строгого математического доказательства закона всемирного тяготения. Подобные поиски сопровождались обдумыванием физических гипотез, объясняющих тяготение. Но в «Математических началах натуральной философии» Ньютон устранил леса гипотетических допущений, и стройное здание новой системы представилось современникам в виде абсолютно непоколебимой, как им казалось, строгой конструкции, якобы не требовавшей гипотез, целиком основанной на опыте и математических доказательствах. По-видимому, освобождение от предварительных неоднозначных гипотез также было условием опубликования работ Ньютона. Во всяком случае, в течение двадцати лет после первоначальных размышлений и вычислений Ньютон не опубликовал никаких работ, относящихся к проблеме тяготения. Только в 1685 г. он окончательно решил проблему центростремительного ускорения для тел, движущихся по любой замкнутой кривой, проблему притяжения сферических тел и воспользовался при этом новыми данными о величине градуса меридиана. После этого закон тяготения приобрел ту классическую форму, в которой он изложен в «Началах».

В работах 80-х годов Ньютон последовательно убирал следы физических допущений, из которых он исходил в поисках закона тяготения. В эти годы было создано строгое математическое доказательство закона тяготения; из него были выведены законы Кеплера; в эти годы Ньютон пришел к окончательным формулировкам законов движения, и, наконец, в 1687 г. после многократного редактирования появилось первое издание «Математических начал натуральной философии». Мы располагаем довольно подробными сведениями об эволюции взглядов Ньютона в 80-е годы.

В первой половине 80-х годов несколько членов Королевского общества одновременно разрабатывали проблему тяготения. Друг Ньютона Галлей, исходя из учения Гюйгенса о центробежных силах, пришел к обратной пропорциональности между тяготением и квадратом расстояния; он исходил из третьего закона Кеплера, т. е. из пропорциональности между квадратами радиусов и кубами периодов движения по орбитам. Предполагая, что орбиты круговые, Галлей при помощи теорем Гюйгенса доказал закон тяготения. В 1686 г. Галлей в письме к Ньютону вспоминал о беседах, которые происходили за несколько лет до этого в Лондоне между Реном, Гуком и Галлеем. Все они разными путями приближались к тезису о тяготении, обратно пропорциональном квадрату расстояния, и были согласны в признании необходимости вывести законы Кеплера из закона тяготения. Но ни Гук, ни Галлей, ни Рен не могли из тяготения и из сочетания тангенциальной силы с центростремительной вывести формулы эллиптического движения, соответствующего кеплеровым законам. Как вспоминает Галлей, Рен предложил выдать премию — книгу ценой в 40 шиллингов — первому, кто выведет эллиптическую формулу орбит из закона тяготения. В августе 1684 г. Галлей приехал в Кембридж и, встретившись с Ньютоном, заговорил об интересовавшей их проблеме. Ньютон сообщил Галлею, что доказательство изложено в рукописи, которая вскоре будет послана им в Лондон. Галлей получил рукопись в ноябре 1684 г. и, месяц спустя, доложил ее содержание Королевскому обществу. Рукопись называется «О движении» (De motu); она представляет собой как бы первый вариант «Математических начал натуральной философии».

Представление о «Началах» как об откровении сверхчеловеческого разума помешало многим увидеть те противоречия и нерешенные проблемы, которые придают этой книге характер исторического документа развивающейся науки. Содержание «Начал» не укладывается в застывшую догматическую форму. Мы встречаем здесь живые противоречия развивающегося познания, и при знакомстве с ними сам облик Ньютона становится более разносторонним, живым, противоречивым и интересным.

Если взглянуть с этой точки зрения на закон всемирного тяготения, то можно увидеть некоторые «пятна на Солнце», которые стали в дальнейшем поводом для критики системы Ньютона и для ее развития и обобщения. К ним относится несоответствие вычислений, основанных на законе тяготения, с наблюдением движения Меркурия, случайный характер совпадения тяжелой и инертной массы, недостаточность тяготения для объяснения генезиса солнечной системы, передача тяготения через пустоту.

Эллиптическая орбита Меркурия должна постепенно изменяться благодаря притяжению других планет, но если исключить возмущение, орбита каждой планеты должна оказаться точным эллипсом, а большая ось, соединяющая ближайшую к Солнцу точку планеты, перигелий, с наиболее отдаленной, афелием, должна оказаться неподвижной. Работы Леверье в 1845 г. с полной непреложностью показали, что в действительности бóльшая ось орбиты Меркурия медленно вращается, смещаясь в течение столетия на 43 дуговые секунды. Принципиальное значение расхождения между теорией и наблюдениями в данном случае усугубилось тем, что это расхождение относится к Меркурию — ближайшей к Солнцу планете. Вблизи Солнца силы, притягивающие к нему планеты, всего больше. Поэтому тот факт, что ближайшая к Солнцу планета отклоняется от движения, строго предписанного ньютоновым законом, показывает, что сам закон, видимо, не точен. В течение многих десятилетий этому обстоятельству не придавали особенно большого значения, так как закон тяготения подтверждался сотнями других наблюдений.

Успехами закона тяготения затушевывалось еще одно обстоятельство. Из ньютоновой механики вовсе не следовала пропорциональность между весом и массой. Больше двух веков загадка тождества инертной и тяжелой массы

находилась в тени. Рациональное объяснение тождества инертной и тяжелой массы было связано с новой теорией тяготения.

Наиболее серьезное «темное пятно» ньютоновской небесной механики — первоначальный толчок. Тяготение и инерция объясняют, как сохраняется эллиптическая орбита планеты, но начало этого движения и эксцентриситет орбиты можно объяснить лишь первоначальным толчком. Ньютон предоставил эту функцию богу, причем вмешательство бога не могло быть однократным. Время от времени, не говоря уже о библейских и прочих чудесах, богу предстоит повторять первоначальный толчок. Из закона тяготения, согласно Ньютону, вытекает, что в конце концов пути небесных тел изменятся и для восстановления небесного порядка потребуется новое вмешательство бога.

Нужно заметить, что такая роль бога не удовлетворяла его защитников на континенте. В первом письме к принцессе Каролине Лейбниц жаловался на падение естественной религии в Англии и, в частности, писал о Ньютоне: «Г. Ньютон и его последователи имеют, кроме того, забавное мнение о деле божьем. Согласно им, бог имеет нужду от времени до времени заводить свои часы: иначе они остановятся. Он не сообразил снабдить их вечным двигателем. Эта божья машина к тому же, по их мнению, так несовершенна, что бог вынужден ее от времени до времени особым актом смазывать и даже исправлять, как часовщик, считающийся тем худшим мастером, чем чаще он прибегает к исправлениям часов».

Ученых, не допускавших бога в природу, теологический первоначальный толчок еще меньше мог удовлетворить. Здесь, однако, не требовалась коренная переработка ньютоновской системы. Космогонические теории объясняли первоначальный толчок физическими процессами в первичном веществе. Таким образом, это пятно ньютонианства не было связано с существом классической механики.

С ее существом не была связана и другая идея — действие через пустоту. Но с ней было труднее справиться, чем с первоначальным толчком. Кинетическая теория тяготения никогда не приобретала такой определенности и такого значения в науке, как космогонические гипотезы. Однако тенденция объяснить тяготение наличием эфира всегда существовала в науке. Была она, как мы видели, и

у Ньютона. Это не мешало ему подчас приписывать богу передачу тяготения. Адам Смит писал, что ни у одного народа на земле не было бога тяжести. Действительно, тяжесть всегда рассматривалась как рациональная сила. Но уже в теологических экскурсах «Начал» возник этот «бог тяжести».

Для XVIII в. первоначальный толчок и дальнодействие были наиболее острыми пунктами научно-философских дискуссий. В XX в. более актуальное значение приобрели другие темные пятна на чистых ризах ньютонианства — бесконечные силы тяготения, получающиеся при бесконечности Вселенной, случайное тождество инертной и тяжелой масс, неправильность движения перигелия Меркурия. Только новая теория тяготения — общая теория относительности — дала ответ на эти «проклятые вопросы» старой механики. Но в XVIII в. для характера научной картины мира особенно важной была проблема первоначального толчка. Именно в этом пункте неподвижная, неисторическая, а подчас даже антиисторическая картина мира оказалась недостаточной, и здесь был нанесен ей удар, положивший начало исторической картине мироздания.

Неподвижность природы в «мировоззрении Ньютона — Линнея» была связана с методом и стилем ньютонианства. Если для картезианской физики характерно стремление показать *возникновение* самых сложных явлений из однородной материи, наделенной неуничтожаемым движением, то для ньютонианства характерна *систематизация* явлений, разделение их на определенные роды и отделы без выведения одного явления из другого. Картезианец не прекращал спрашивать «почему», пока не приходил к простому механическому перемещению, к удару, к толчку, к взаимодействию бескачественных частей материи. Ньютонианец подчас не желал рисовать кинетическую картину и ограничивался простым отнесением явления к другим, однородным. Поэтому «физика принципов» Ньютона тесно связана с систематизирующей тенденцией в науке XVII—XVIII вв.

Чисто динамическое исследование, «физика принципов», сведение задачи науки к установлению математических уравнений, отказ от анализа кинетических причин — все это при абсолютизировании, при забвении их условного характера ведет к характерной для XVIII в. идее неизменности Вселенной.

Теологическая концовка «Начал», как и теологическая концовка всего ньютоно-линнеевского мировоззрения, не помешала классической механике сыграть глубоко революционную роль не только в науке, но и в материальном и идейном развитии общества в целом. В науке стройная и вместе с тем содержавшая нерешенные проблемы — исходные пункты дальнейшего развития — система, универсальная научная картина мира, разработанная с неизвестными предшествовавшим временам строгостью и однозначностью, опиравшаяся на сравнительно многочисленные четкие и точные эксперименты, была основой дальнейших революционных шагов. В XVIII в. механика Ньютона показала и свою практическую ценность, в ходе английской промышленной революции, а за Ламаншем Вольтер сделал «Математические начала натуральной философии» оплотом борьбы против церкви, борьбы, подготовившей французскую революцию.

В предисловии Котса ко второму изданию «Начал» говорится, что «превосходнейшее сочинение Ньютона представляет вернейшую защиту против нападок безбожников и нигде не найти лучшего оружия против нечестивой шайки, как в этом колчане». Но, вопреки теологическим тенденциям в мировоззрении самого Ньютона, вопреки попыткам сделать «Начала» «колчаном» теологической апологетики, живое содержание развивающейся науки выявило свой антитеологический смысл уже в первой половине XVIII столетия. В 30-е годы этого столетия остроумная и боевая популяризация ньютоновых «Начал» в «Философских письмах» Вольтера показалась католической церкви настолько опасной, что книга Вольтера, по решению парижского парламента, была сожжена рукой палача. Первый период в развитии нового естествознания начался революционной книгой Коперника и завершился «божественным толчком». Новый период начался славословиями английских теологов в адрес «Математических начал натуральной философии», а через несколько десятилетий книга, излагавшая «Начала», была сожжена по настоянию французских теологов. Правда, ньютонианство приобрело явный антитеологический характер лишь на почве, где борьба передовых мыслителей против церкви зашла дальше всего.

Во второй половине XVIII в. в мировоззрении французских материалистов ньютонианство соединилось с вы-

державшими проверку времени элементами картезианской физики в сплав, из которого энциклопедисты ковали оружие против церкви и трона. Это был новый период в развитии науки.

### 5. Динамизм и атомистика

В XVIII—XIX вв. была построена картина мира, в которой дискретные тела противостояли не пустоте — нейтральному простому «небытию» Демокрита, а некоторой физической реальности, получившей название *поля*. Сейчас, когда классическое противопоставление вещества и поля сменилось концепцией частиц как элементов поля, мы можем отчетливей понять эволюцию этого фундаментального понятия. Сначала оно фигурировало в науке в качестве формального обозначения некоторых величин, характеризующих поведение дискретной частицы в пустоте. Затем выросло представление о континуальной *среде*, определяющей поведение погруженных в нее тел. Эта континуальная среда в XX в. оказалась неспособной служить телом отсчета для движущихся в ней тел, и в то же время подверглась сомнению, ограничению и усложнению идея континуальности поля. Здесь мы рассмотрим *предысторию* учения о поле как о континуальной физической среде, в которую погружены частицы, обладающие не только протяженностью, но и динамическими свойствами.

Ньютоновский динамизм оказал существенное воздействие и на характер представлений о частице. Ее тождественность самой себе представляется не только сохранением величины и формы (как это было в атомистических концепциях XVII в., заимствованных у древних), но также *сохранением массы как коэффициента*, измеряющего величину силы, действующей на частицу в заданной точке при заданной напряженности поля. Динамическая характеристика частицы — существенный новый шаг в развитии атомистики. Подчеркнем, что значение этого шага легче понять при ретроспективной оценке в наше время, когда характеристика поля стала неотъемлемой характеристикой частицы.

Возьмем атомистику XVII в. Она не могла выйти за *пределы картезианской геометризации вещества*, хотя и отказалась от картезианского отождествления веществ

и пространства. Вещество отличается от пространства, которое может быть пустым, но *чем* именно оно отличается?..

У Гассенди и Бойля атомы характеризуются величиной и формой, т. е. пространственными предикатами. Но что, собственно, отличает заполненное пространство от пустого? На этот вопрос было так же трудно ответить, как на вопрос об отличии тела от окружающих тел в физике Декарта.

В поисках ответа наука после Ньютона (отчасти со времени Ньютона) наделила частицы динамическими свойствами. При этом необходимый виток познания был абсолютизирован и привел к представлению о непротяженных динамических центрах и протяженности как о вторичном свойстве тел, вытекающем из первичных динамических свойств.

Лейбниц говорил, что из протяженности нельзя вывести динамические характеристики тел. Если материя обладает только протяженностью, то ее свойства могут быть лишь геометрическими. Материя может быть делима, может двигаться, но движение не может возникнуть, не может быть передано другому телу, если тело тождественно пространству и обладает лишь геометрическими свойствами. Тело тогда не может также обладать массой, сопротивляться внешним импульсам. Поэтому Лейбниц отказывается от картезианского отождествления материи и пространства. Он говорит, что при картезианском отождествлении материи и пространства абсолютная неразличимость и однородность частей пространства превращаются в неразличимость и однородность материи, и это не дает возможности отличить одно тело от другого и одно событие от другого.

В 1691 г. Лейбниц опубликовал небольшое «Письмо по вопросу, состоит ли сущность тела в протяженности». В нем говорится: «Я согласен с тем, что всякое тело естественно протяженно и что нет также протяжения без тел. Но тем не менее не следует смешивать понятий места, пространства и чистого протяжения с понятием субстанции, заключающим в себе, кроме протяжения, еще и сопротивление, т. е. действие и способность подвергаться действию».

В сущности речь здесь идет об инерции. Без этого свойства тело не могло бы, с одной стороны, сопротивлять-

ся толчку, с другой,— производить толчок. Неразличимость частей пространства (одного «здесь» и другого «здесь») ведет к неразличимости времени (одного «теперь» и другого «теперь»).

Сама протяженность тела, по мнению Лейбница, не имеет смысла, если тело не обладает динамическими свойствами. Тело проявляет свою протяженность в силу непроницаемости. Декарт, как мы видели, приписывал непроницаемость частям самого пространства и таким образом «физикализировал» его. Лейбниц, напротив, считает непроницаемость выражением динамических непространственных свойств тел. Пространство — несубстанциальная категория, протяженность — результат активного динамического бытия тела.

В работах Лейбница констатация действительных трудностей картезианской физики переплетается с защитой теологии. Механическое объяснение природы может стать, по мнению Лейбница, непротиворечивым и в то же время безопасным для теологии, если вместо геометризации материи основой этого объяснения станет наделение материи динамическими свойствами как единственно субстанциальными.

«Эти соображения,— пишет Лейбниц,— кажутся мне важными не только для познания природы протяженной субстанции, но также для того, чтобы не пренебрегать в физике высшими и нематериальными началами в ущерб благочестию. Хотя я убежден, что в телесной природе все делается механически, тем не менее я полагаю, что самые принципы механики, т. е. первые законы движения, имеют более высокое происхождение, чем то, которое может дать чистая математика. Если бы это было более известно и в большей степени принималось во внимание, многие благочестивые люди не имели бы, я думаю, такого дурного мнения о корпускулярной философии, а новые философы лучше соединяли бы познание природы с познанием ее творца» [23].

Лейбниц говорит, что протяженность — результат действия непротяженной динамической субстанции, вернее, множества отдельных субстанций, которые Лейбниц в 1697 г. назвал *монадами*. Монады — это не геометрические точки, последние предполагают существование простран-

[23] «Leinnitii opera philosophica». Erdman, Berlin, 1839, p. 114.

ства, а монады сами, по словам Лейбница, создают пространство. Это и не атомы, так как атомы протяженны. Пространство у Лейбница объявляется феноменологической категорией, как и время, пространство — порядок явлений, наблюдаемых в один и тот же момент, а время есть порядок явлений, следующих одно за другим. Пространственно-временно́й мир изменяется в силу механических причин. Монады как непротяженные сущности не оказывают воздействия на физические процессы. Соответствие между каузальным пространственно-временны́м миром и миром духовных сущностей устанавливается в силу предустановленной гармонии, которая приняла у эпигонов Лейбница, и прежде всего у Вольфа, форму самой плоской телеологии [24].

Нам нет нужды следовать за Лейбницем в область весьма искусственных и тяжелых конструкций монадологии. Естествоиспытатели XVIII в., разделявшие концепцию монад, понимали под ними непротяженные силовые центры. Как бы ни стремился Лейбниц унести монады в метафизический мир духовных сущностей, в науке фигурировали непротяженные динамические атомы, которые вскоре оказались исходным пунктом собственно атомистических представлений, оперировавших протяженными частицами.

Здесь не только действовали собственно исторические причины, но и раскрывалась внутренняя логика концепции Лейбница. Последний хотел построить всю сложную картезианскую систему кинетического объяснения отдельных процессов природы на базе новых исходных принципов, уже не кинетических, а динамических, и при этом вывести из них философские заключения в духе объективного идеализма, телеологии и прямой теологии. Но внутренняя логика механических и математических понятий, которые Лейбниц противопоставлял картезианству, была обращена в другую сторону, она ломала рамки лейбницевой философской схемы и в конце концов вела к атомистике. Мы можем увидеть прямые связи между категориями, введенными Лейбницем и научным творчеством мыслителей XVIII в., выросших в эпоху прямого штурма теологии и принявших участие в этом штурме.

---

[24] См. К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, 2-е изд., т. 20. М., 1961, стр. 350.

Мы снова встречаемся с характерным для современного исторического анализа обнаружением *вопросов* там, где раньше видели только *ответы*. Мы видели это на примере Ньютона.

Идеи Ньютона казались последующим двум столетиям еще более окончательными, чем идеи Аристотеля средним векам. Но мы знаем, что живая, незастывшая струя поисков и подходов пробивалась и через творчество Аристотеля. Эта струя проходит через всю историю науки. Во всех крупных научных теориях, даже самых канонизированных, мы встречаемся с «духом Фауста», который Гёте с таким глубоким пониманием сущности научного творчества противопоставил филистерскому «духу Вагнера». Именно поэтому к истории науки относятся слова Жореса: «Взять из прошлого огонь, а не пепел».

Поиски и вопросы, обращенные к будущему, существуют в науке наряду с позитивными утверждениями, а чаще всего в форме позитивных утверждений. Только ретроспективный анализ обнаруживает проблематичность этих утверждений и их действительное историческое значение. Примером различия между собственными выводами ученого и действительным смыслом введенных им понятий служит и «континентальная» линия динамизма XVII—XVIII вв.— динамизм Лейбница. Сейчас мы знаем, что идеи Лейбница содержали такие адресованные будущему вопросы, на которые ответила наука только XIX в.

Атомистические идеи XVIII в., ближе всего связанные с дальнейшим развитием атомистики, исходили из протяженности частиц и из первичного характера их протяженности. Характерна позиция Ломоносова. Он не мог согласиться с мыслью о вторичном характере протяженности тел и ее выведением из бытия непротяженных сущностей. Протяженность — исходное свойство тел, и нельзя искать основание этого свойства, выводить его из других [25].

Атомистика Ломоносова противостоит лейбнице-вольфовской концепции непротяженных динамических центров, но это отнюдь не возврат к воззрениям XVII в., к идеям Гассенди и Бойля. Атомы Ломоносова характери-

[25] См. М. В. *Ломоносов*. Полное собрание сочинений, т. III. М.— Л., 1952, стр. 358.

зуются принципиально измеримыми динамическими характеристиками — инертной массой и весом. Именно поэтому Ломоносов мог перейти от идеи сохранения числа атомов к идее сохранения массы. Ломоносов придавал большое значение изменению взаимодействия атомов при переходе от одной конфигурации к другой, и в отличие от Бойля, он очень осторожно выдвигал какие-либо гипотетические конструкции. Правда, он приписывал частицам углубления и выступы, делающие их поверхность шероховатой, но в ряде проблем физики и химии Ломоносов объясняет свойства тел и изменения этих свойств не формой и не величиной, а конфигурацией и изменениями конфигурации атомов. Соответственно в моделях фигурируют в основном не формы и размеры атомов, а их положения и скорости.

Атомистика позволила отказаться от ньютоновского «первого толчка».

Во «Всеобщей естественной истории неба» Кант критикует эту идею божественного толчка, которым мир был пущен в ход, чтобы дальше двигаться под влиянием инерции и взаимного тяготения тел. Ньютон писал, что движение планет — это «перегородка, отделяющая друг от друга природу и перст божий». Кант называет подобную мысль «жалким для философа решением вопроса» [26] и хочет найти каузальное объяснение начальных условий движения небесных тел. В солнечной системе нет сил, которые объясняют первоначальный толчок. Отсюда следует только, что подобная сила существовала раньше. Она состояла в притяжении и отталкивании молекул первичной туманности. Кант рассказывает, как притяжение и отталкивание молекул вызвало в конце концов вихревые движения. Далее излагается идея вращения туманности, приводящего к тому, что части ее отрываются, превращаются в планеты, а центральная часть туманности — в Солнце. Солнечная система входит в более обширную систему Млечного Пути, образовавшуюся аналогичным путем. Система Млечного Пути входит в еще более обширную систему. Иерархия таких систем бесконечна. Скорость движения небесных тел вокруг центров тяготения уменьшается, в конце концов они падают на центральные тела, и эти столкнове-

[26] J. Kant. Allgemeine Naturgeschichte des Himmels. Kants Werke, Bd. VIII. Hartenstein, Leipzig, 1839, S. 351.

ния приводят к появлению новых туманностей: «Природа — это Феникс, который сжигает себя, чтобы снова выйти обновленным из пепла» [27].

Сходные идеи развивал впоследствии Лаплас. Теория Канта — Лапласа стала на долгое время наиболее распространенной космогонической концепцией. Слабым местом ее было в сущности произвольное выведение вращательных движений из центральных сил молекулярного притяжения и отталкивания. Центральные силы не могли объяснить вращение туманности. Кант предположил, что начальные условия макроскопического движения небесных тел созданы молекулярными движениями, но он не мог тогда сказать ничего определенного об особенностях молекулярных движений. Объяснить первоначальный толчок при помощи атомистических представлений — это был гениальный замысел. Однако в XVIII в. он не мог воплотиться *в однозначную концепцию* прежде всего потому, что ничего не было известно о специфических закономерностях, отличающих молекулярные движения от движений макроскопических тел. Нужно сказать, впрочем, что и в XIX в., когда стали известны статистические закономерности молекулярной физики, космогонические проблемы не могли быть решены однозначным образом, да и сейчас они не решены; этот вопрос связан не только с закономерностями молекулярных движений, но также со специфическими закономерностями, управляющими поведением — движением и превращениями — атомов, атомных ядер и элементарных частиц. Но в XVIII в. не было еще *сколько-нибудь отчетливого представления* о специфических формах движения, такое представление содержалось лишь в зародыше как возможная физическая интерпретация уже появившихся математических понятий.

В работах Лапласа атомистика выявила свою чрезвычайно важную для XVIII и начала XIX в. идейную функцию — обоснование универсального механического детерминизма.

В принципе все процессы во Вселенной сводятся к движению частиц, зависящему от их положений и скоростей. Эта идея дала основание Лапласу не только ответить На-

[27] J. Kant. Allgemeine Naturgeschichte des Himmels. Kants Werke. Bd. VIII. Hartenstein, Leipzig, 1839, S. 338.

полеону великолепной формулой антитеологического смысла науки XVIII в., но и высказать еще более известный итог века Разума. Лаплас писал, что существо, знающее для данного момента положения и скорости всех частиц Вселенной, могло бы с абсолютной точностью предсказать все последующие события: космические, физические, химические — вплоть до исторических судеб человечества и конкретных исторических фактов будущего.

# IV. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ

## 1. Наука XVIII — XIX вв.

Наука XVIII в. может рассматриваться как некоторая единая картина мира, если ее основным, объединяющим стержнем считать однозначное и претендующее на абсолютную полноту объяснение всех явлений природы движением и взаимодействием дискретных тел, которые описываются дифференциальными уравнениями движения (их истоком служит второй закон Ньютона) и уравнениями поля (их прообраз — закон тяготения).

Наука XIX в. объединяется идеями *несводимости* сложных процессов к движению и взаимодействию частиц и *неотделимости* сложных процессов от движения и взаимодействия частиц, описываемых классическими уравнениями. Когда мы говорим: «наука XVIII—XIX вв.», то это должно обозначать переход от свойственной XVIII столетию классической механистической концепции мира к свойственной XIX столетию концепции сложного многокрасочного мира с качественно различными формами движения. Этот переход не был бы органическим, если бы в теориях XVIII в. не было внутренних апорий, требовавших для своего преодоления апелляции к более сложным процессам, несводимым к механике, и если бы эти апории не были в какой-то мере осознаны уже в XVIII в.

Для культуры XVIII в. характерна идея однозначности, строгой и точной зависимости одних явлений от других.

Наука располагает явления в цепочки причин — следствий, вырывая их из всеобщей и бесконечной космической связи; она, по выражению *Шиллера*, *интересуется* «продольными» связями, отметая бесчисленные «попереч-

ные» 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 произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния. Но указанная зависимость — абстракция: 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, осложняющий первоначальную простую задачу. Нужно сказать, что и два тела в пустоте — это сравнительно сложная 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. Сначала координаты, затем скорости, ускорения и т. д. рассматриваются как линейные функции времени.

Линейный характер связей между конечными величинами соответствует действительности лишь в той мере, в какой законно абстракционное 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 рав-

номерно 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.

Представление о неизменной зависимости двух величин, сохраняющейся при неограниченном их возрастании или уменьшении, оказало колоссальное влияние на науку и культуру XVIII в. Различие между рационалистическим «линейным» мышлением XVIII в. и мышлением XIX в., учитывающим бесконечную сложность мира, видно не только в науке и философии, но и во всей культуре двух веков, в частности в художественной литературе и даже в обыденном мышлении людей. 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 Гёте провозглашает новый взгляд на природу. Никогда еще не было высказано с такой энергией и художественной силой ощущение многокрасочного мира. Гёте, 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. Гёте считает антропоморфными и теоретический анализ, и эксперимент: они вносят в природу не свойственные ей понятия. «Теория, друг мой, сера, но зелено вечное дерево жизни» — основной принцип научного мировоззрения Гёте. Причин-

ное объяснение явлений охватывает только некоторые стороны их и раскладывает явления в длинные нити причин и следствий. Но в этих нитях, говорит Гёте, теряются другие связи явлений, которые не входят в получившиеся причинные ряды. Излагая эти мысли Гёте, Шиллер говорил, что причинное объяснение «принимает в расчет только длину, а не широту природы». Напротив, Гёте видит «всю природу во взаимодействии... и поэтому остерегается принимать причинность лишь в виде скудной длины: он всегда берет в расчет и ширину». Чтобы не искажать природу вносимым извне абстрактными категориями, нужно брать действительность такой, какой она представляется созерцанию, т. е. во всем ее конкретном многообразии. Разумеется, Гёте 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 эпигонам. Гёте допускает необходимость теоретического расчленения природы, но мысль о его относительности ограничивает, сдерживает и 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 Гёте. 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 Гёте в области биологии имели для своего времени существенное значение. На характер научного мышления эпохи значительно 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 [1]. Поэтому идеи Гёте не могли изменить основное направление развития науки XVII—XIX вв.— восхождение от исходных абстракций «Начал натуральной философии» ко все более конкретным построениям. Но борьба против догматизирования абстракций ускоряла 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 [2]. 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 XVIII в.

В одной из статей, написанных в 1843 г. («Положение Англии. Восемнадцатый век»), Энгельс говорит, что «науки приняли в восемнадцатом веке 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» [3].

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

---

[1] См. К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 12. М., 1958, стр. 726.

[2] См. К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 21. М., 1961, стр. 273.

[3] К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 1. М., 1955, стр. 608.

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 ньютонианство 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 ньютонианство распространялось через салоны. Но этот широкий охват нецеховых слоев означал лишь связь с общественным движением.

Не деист Вольтер, а философы-материалисты, естествоиспытатели и математики лишили ньютонианство его теологического привеска. Когда в руках Лагранжа классическая механика приобрела характер чисто математической дисциплины, это имело двоякий 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 автоматики 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. Результате ее неисчислимы. Расчленение технологического процесса на элементарные механические операции разбило консервативную техническую базу мануфактуры и сделало про-

изводство 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 которого 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. Это не значит, что последняя была догматической. В свое время она сама была направлена против догматов перипатетизма. Но в XIX в. механическая ограниченность естествознания, 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 генезиса и расцвета?

Механический рационализм XVII в. провозгласил принципиальную возможность чисто логического выведе-

ния 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 не сводимы к исходным простым схемам. Законы механики были экспериментально доказаны для определенного круга явлений. Универсальны ли эти законы? Декарт утверждает их универсальность: без экспериментальной проверки он переносит макроскопические законы в любую область. Ньютон ограничивает область научного знания кругом явлений, допускающих экспериментальную проверку, и очень неохотно говорит о микромире и эфире. Но логическое обобщение экспериментально найденных закономерностей с экспериментальной проверкой их в новых областях, основанной на экспериментальных данных модификацией, усложнением, пересмотром общих исходных схем — эта задача принадлежит XIX в.

В пределах механицизма существовало, таким образом, двоякое 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. Ньютонианское представление о законах механики ограничивает их действие областью явлений, где эти законы уже получили экспериментальное подтверждение, и отрицает гипотезы, хотя последние в действительности не устранимы и неявно присутствуют в содержании «Начал натуральной философии». Чего не знали ни картезианская, ни ньютонианская физика,— это гипотез, основанных на модификации механических законов, на введении понятий, не сводимых 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 век 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 подготовляли аппарат и некоторые

идеи не сводимой к механике физики, опиравшейся на эксперимент при модификации общих схем. Д'Аламбер в 1759 г. в «Опыте об элементах философии или о началах человеческого значения с пояснениями» писал об областях, где «каждый частный случай требует почти отдельного опыта» и где «общий результат всегда ненадежен и несовершенен...» [4].

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.

Но в XVIII в. в самой механике выявились тенденции, которые, как это сейчас видно, вели к выходу за ее пределы, к такому обобщению механических понятий, при которых они могли быть распространены на необратимые процессы, могли фигурировать в статистических концепциях. Речь идет не о сведении статистических закономерностей к механическим законам, а напротив, о модификации последних, об изменении и расширении их смысла. Эта эволюция отчетливо видна при ретроспективном анализе развития *аналитической механики*.

---

[4] D'Alambert. Oeuvres, v. 1. Paris, 1881, p. 336.

## 2. Уравнения Лагранжа

Применение математического анализа к проблемам механики было не только переводом на новый язык законов движения тел и законов их взаимодействия. Дифференциальные уравнения движения, так же как дифференциальные уравнения поля, содержали собственно физическую идею, впрочем, до определенного времени неявную — идею континуума. Эта идея 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 силы. 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.

Механика отвечает на вопрос, почему частица находится в данное время в данной точке пространства. В механике эту точку определяют, 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 независимый 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, электродина-

мика 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 выделении из других величин.

Линия водораздела между механикой и физикой отделяет уравнения движения от уравнений поля. Как уже было сказано, и те и другие независимы, 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.

Каждая механическая 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 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 воздействию на мощь и на стиль 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. Понятие четвертого измерения вошло в науку 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, Плюккера, Римана и в особенности в «Учении о протяженности» (1844 г.) Грассмана [5]. 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 идущая от Лангранжа мысль о состоянии механической системы как о 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 трех чисел, всего $3n$ координатами: $x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \ldots; x_n, y_n, z_n$. Если каждую координату обозначать через $q$ с соответствующим значком: $q_1, q_2, q_3$, 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 $dq, dq_2, dq_3 \ldots$ Если система движения в трехмерном пространстве, изменение ее положения можно представить

[5] См. Ф. Клейн. Лекции о развитии математики в XIX столетии. М.— Л., 1937, стр. 209—221.

в виде $3n$-мерной траектории — результирующего смещения точки $P$.

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 — тождественное себе 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 тепло, если принципиально способны зарегистрировать его существование и определить скорость в каждой точке интервала между одним положением и другим. Из этой *непрерывности* состояний вытекает существование дифференциальных уравнений движения, с помощью которых, зная начальные условия, можно с абсолютной достоверностью предсказать все последующее движение тела. Применив эти соотношения к системе тел, Лагранж по существу перевел на аналитический язык качественные понятия

индивидуальности и себетождественности механической системы, гарантированные непрерывной и однозначной зависимостью ее состояний. Дифференциальные уравнения движения, в которые входят обобщенные координаты $q_i$ и обобщенные скорости $\dot{q}_i = dq_i/dt$, выражают идею классического механического детерминизма.

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

Если система состоит из одной частицы, обобщенные координаты $q_i$ совпадают с обычными координатами, т. е. число $f$ обобщенных координат $q_i$ равно 3. 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 $\dot{q}_i$, позволяющих вместе с координатами задать и узнать не только положение системы, но и ее состояние.

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

Кинетический потенциал — функция Лагранжа $L$ — 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 рассматриваемой системы, т. е. $f = 3n - k$.

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 в форме Лагранжа и Гамильтона широко применяются в физике, 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.

## 3. Принцип наименьшего действия у Мопертюи и Эйлера

Дифференциальная форма законов движения указывает на непрерывность движения и на тождественность движущейся материальной точки или системы материальных точек. Самый же вид функциональной зависимости положения материальной точки от времени и соответственно траектория движущейся точки определяются интегральным *принципом наименьшего действия.* Остановимся на некоторых этапах эволюции этого принципа.

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 непрерывно меняется на пути между точками *A* и *B*, принцип Ферма можно выразить как требование наименьшего значения интеграла обратной скорости по пути.

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 [6]. 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 письме (подлинность его подвергается сомнению) Лейбниц писал, что при движении действие остается обычно максимальным или минимальным [7].

Много лет спустя, в 1774 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,

---

[6] См. G. W. Leibnitz. Mathematische Schriften. Herausg. v. G. J. Gerhardt. Bd. II, Berlin — Halle, 1860, S. 345—366.

[7] См. G. W. Leibnitz. Acta Eroditorum, t. II, 1751, S. 176.

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 творения». Д'Аламбер ответил Мопертюи рядом статей в «Энциклопедии», Вольтер — остроумным и очень злым памфлетом. В спор ввязалось очень большое число 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.

В 1774 г. появилась известная книга Эйлера «Метод нахождения кривых линий, обладающих свойствами максимума или минимума, или решение изопериметрической задачи, взятой в самом широком смысле». 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

$$\int mvds.$$

Эйлер решил ряд задач о движении брошенного тела, последовательно усложняя условия задач, рассматривая сна-

чала однородное поле тяготения, 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.

## 4. Принцип наименьшего действия в аналитической механике Лагранжа

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 Лангранж связывает принцип наименьшего действия с принципом сохранения живых сил. Он сравнивает траектории, соединяющие точки $A$ и $B$, удовлетворяющие требованию постоянства энергии ($E$=const), и приходит к утверждению, что из таких траекторий истинной будет траектория, соответствующая минимуму величины

$$S = \int_{A}^{B} mvds.$$

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. Потенциаль-

ная 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 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 координат 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.

## 5. Принцип Гамильтона и его развитие

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. Сравниваются различные пути частицы, согласующиеся со связями и соединя-

ющие 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

$$S = \int_{A}^{B} mvds$$

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.

Дальнейшая формализация принципа наименьшего действия была произведена Карлом-Густавом Якоби в 30-е годы XIX в. У Якоби 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.

Когда механика вплотную подходит к физическим закономерностям, когда в механике подготовляется 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. 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 науки вперед к такому аппарату, который мог получить уже не механическую, а физическую интерпретацию. В этом прежде всего состоит исторический смысл работ Гамильтона и Якоби, посвященных принципу наименьшего действия.

Якоби очень точно охарактеризовал значение принципа наименьшего действия. Оно состоит прежде всего в связи принципа с дифференциальными уравнениями Лагранжа 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» [8].

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 [9]. В 1848 г. в докладе на собрании Петербургской Академии наук он вывел принцип наименьшего действия из более

---

[8] К. Г. Якоби. Лекции по динамике. М.—Л., 1936, стр. 44. Изд. 2. М.: URSS, 2004.

[9] См. M. Ostrogradski. Mémoire sur les équations differentielles relatives au problémes isopérimetres. Mém. l'Acad. Sc. St.-Petersb., 1850, p. 385—517.

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 свой работе 1848 г. рассматривал принцип наименьшего действия без указанных условий.

Переход от собственно механической интерпретации принципа Гамильтона к более общему его пониманию, подготовлявшему 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 применял 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 принцип 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» [10].

В истории вариационных принципов мы встречаемся с именем Гаусса.

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» [11].

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 предпринята им в начале 90-х годов в книге «Принципы механики, изложенные в новой связи» [12].

---

[10] М. Планк. Физические очерки. М., 1925, стр. 95.

[11] Русск. пер. статьи Гаусса. см. в кн.: Ж.—Л. Лагранж. Аналитическая механика, т. II. М.— Л., 1950, стр. 412.

[12] Г. Герц. Принципы механики, изложенные в новой связи. Изд-во АН СССР, 1959.

Герц рассматривает пути, характеризующиеся наименьшим искривлением. Это и есть прямейшие пути. Таким образом, Герц сближает основные принципы механики с геометрическими понятиями — учением о кривизне. Но для этого необходимо ввести представление о пространстве многих измерений и рассматривать кривизну многомерного пространства.

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. 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.

В конце XIX в. попытки геометризации вариационных принципов механики почти не прекращались. Постепенно в механике начало играть все большую роль представление о динамической системе как точке, движущейся в многомерном пространстве. Силовые поля при этом представляются искривлениями многомерного пространства, нарушающими его эвклидовость. 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 было бы сказать, что различие превращается в геометрическое различие между «плоским» и искривленным многомерными пространствами.

# V. СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ

## 1. Развитие понятий живой силы, работы и энергии в механике

История вариационных принципов показывает, как математическое обобщение понятий механики подготовляло новое, собственно физическое переосмысление этих понятий. Физическим эквивалентом обобщенного математического аппарата механики, созданного Лагранжем, Гамильтоном, Остроградским, Якоби, Гельмгольцем и другими мыслителями XVIII—XIX вв., была физическая картина превращения энергии, выходившая 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 [1], содержалось в ряде собственно физических исследований, особенно в 80-е 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 являются одной из основных проблем при историческом анализе классической физики и генезиса обобщенного представления о движении, не сводимом 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 [2]. Но Ньютон не помышлял о системе механики, выведенной из принципа сохранения некоторой меры движения, неизменной в случае упругого удара и тому подобных механических явлений.

---

[1] К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, 2-е изд., т. 20, М., 1961, стр. 13.

[2] И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова. Изв. Николаевской морской акад., вып. IV. Пг., 1915, стр. 40—42. Изд. 3. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008.

Что же касается принципа сохранения энергии в современном 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 осуществить такой подъем опирается на невозможность построить вечный двигатель, 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 два). Понятие (но не наименование) живой силы фигурировало еще раньше в теории упругого удара. Было установлено не только 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[3]. Последний отождествлял энергию с работой (впрочем, лишь в одном, ныне утраченном письме к Вариньону). И. 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 agenti. Он говорил, что эта способ-

[3] См. М. Планк. Принцип сохранения энергии. М.—Л., 1938, стр. 22.

ность сохраняется в другой форме, например в виде сжатия. Но И. Бернулли в известных нам работах и, по-видимому, в упомянутом письме к Вариньону не думал о немеханических количественных понятиях, которые позволили бы измерить facultas agenti, сохраняющуюся при исчезновении живой силы..

Эйлер, подобно И. 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 [4], обобщил закон сохранения, рассмотрев ряд задач о движении материальной точки в различных условиях. В вышедшей за десять лет до упомянутой работы «Гидродинамика» (1738 г.) Д. 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 [5]. 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 синтеза этих идей там не было, его не знал ни XVIII век, 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

[4] См. D. Bernouli. Remarques sur le principe de la conservation des forces vives, pris dans un sens générale. Histoire de l'Academie de Berlin, 1748, p. 356.

[5] См. русский перевод этой главы в сб. «Основатели кинетической теории материи». М.— Л.. 1934.

тел,— эти понятия не могли стать непосредственно основой закона сохранения энергии. Требовалось сопоставить динамическую переменную, включающую 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 [6].

Термин «энергия» в смысле динамической переменной с размеренностью лейбницевой меры движения появился в начале XIX в. у Юнга в его известном курсе натуральной философии (1807 г.). 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 представление 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 [7]. Наряду с количеством движения Юнг пользуется понятием живой силы и именует эту величину *энергией* 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

---

[6] См. J. Poncelet. Cours de mécanique appliquée aux machines. Metz, 1826.

[7] См. Th. Young. A course of lectures on natural philosophy. London, 1807, p. 75.

случае, когда механическое движение не переходит в другую форму движения.

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 [8].

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.

## 2. Идея сохранения и учение о теплоте

Уже Лейбниц иногда связывал сохранение движения с представлением о невидимых движениях в микрокосме. «Я утверждал,— писал он,— что действующие силы сохраняются в этом мире. Мне возражают, что два мягких или неупругих тела, встречаясь друг с другом, теряют свою

[8] К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, 2-е изд., т. 20, М., 1961, стр. 391—422.

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 многих 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.— среди них особенно энергично Ломоносов,— но это понятие сохранялось вследствие 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 можно объяснить лишь изменением теплоемкости. Румфорд об-

наружил, 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 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, 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 волновую природу 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 г.) Юнг утверждает, что теплота не отличается по своей природе от света, что она представляет собой лишь несколько более медленные колебания, чем те, которые дает ощущение света. Наряду с исследованием теплоемкости и учением об упругости газов открытия Гей-Люсака, Дюлонга, Пти и других ученых в значительной степени подготовляли 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 сомне-

вается, 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». 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: «ограниченна 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» [9]. 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 холодильную 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 Роберта 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 механиче-

[9] Сб. «Второе начало термодинамики». М.— Л., 1934, стр. 19.

Изд. 3. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2009.

ская работа в тепловой машине. Д. Бернулли, рассматривая движение поршня в цилиндре, наполненном газом, объяснял это движение эквивалентной затратой (т. е. исчезновением) живых сил 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 *работу*, именно работу перемещения неуничтожаемого количества тепла — теплорода. Работа производится за счет эквивалентной затраты другой работы: работа движущегося поршня 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. Произведение количества теплоты (теплорода) на разность температур эквивалентно работе, произведенной тепловой машиной. Клапейрон, излагая концепцию Карно, вычислял эквивалент произведенной работы, умножая количество теплоты на температуру (точнее, на температурный перепад). По его вычислениям переход калории через температурный перепад в один градус соответствует подъему 1,41 *кг* на 1 *м*. Такой эквивалент механической работы соответствует закону сохранения энергии, если под энергией, сопоставленной с механической работой, понимать произведение количества тепла и температуры [10].

Представление о произведении количества тепла и температуры как об эквиваленте работы позволило Вильяму Томсону [11] 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

---

[10] См. М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 25.
[11] См. Phil. Mag., v. 3, N 33, 1848, p. 313.

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 30-е годы Карно приблизился к иной концепции, которая принципиально не 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. Смысл подобных замечаний был раскрыт в опубликованных после смерти 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. Обратно: всегда при исчезновении тепла возникает движущая сила. Таким 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» [12].

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 1 $м^3$ воды (т. е. 1000 *кг*) на высоту 1 *м* 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 созидается и не разрушается» [13].

---

[12] Comptes rendus, v. 87, 1878, p. 967.
[13] Там же.

## 3. Работы Майера, их содержание и историческое значение

Механическая теория тепла и закон сохранения энергии были установлены в 40-е годы XIX в. в ряде работ Майера. Остановимся на содержании его статей «О количественном и качественном определении силы» (1841 г.), «Замечания о силах неживой природы» (1842 г.), «Органическое движение в связи с обменом вещества» (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 экспериментаторов, 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, которые Майер положил 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 ни 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» [14].

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 след-

---

[14] E. Meyerson. Du cheminement de la pensée, I. Paris, 1931, p. 234.

ствий. 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» [15].

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 существующую первоначальную разность. Таким образом, принцип, согласно которому раз данные силы количественно неизменны, подобно веществам, логически обеспечивает нам продолжение существования разностей, а значит, и материального мира» [16].

Под «пространственной разностью» Майер подразумевает потенциальную энергию груза, поднятого на известную высоту. В письме к Бауру 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» [17].

Основная проблема, которую Майер разрешает в своей первой статье, состоит в следующем: куда переходит энергия движущегося тела при неупругом ударе. В случае

[15] Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1933, стр. 61.

[16] Там же, стр. 61—62.

[17] Там же, стр. 63.

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 доказывает, что в данном случае часть движения переходит в теплоту.

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» — появился 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» [18].

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.

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,

[18] Там же, стр. 76.

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 времени. Поэтому под причинной связью подразумевается связь между неодновременными событиями. Чем же отличаются друг от друга разновременные события? Механика сводит их различие к различию конфигураций систем, т. е. положение 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 отсчёта, а $t$ — время. Неподвижное тело не имеет меняющихся предикатов. 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, чтобы выяснить смысл 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 временно́й оси. Импульс $mv$ не может быть мерой «силы» при подобном переходе: импульсом обладают лишь перемещающиеся тела. Более общее понятие движения, включающее и изменение неподвижного (при игнорировании отдельных внутренних движений) тела, должно измеряться другой величиной — «силой» в лейбницевом 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 Майер понимает этот термин, представляет собой энергию. Соответственно сила в ньютоновом понимании именуется у Майера свойством.

Разграничение силы (лейбницевой силы) и свойства (ньютоновой 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, VIII 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 совпадет 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, мертвой 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» [19].

Остается отнять название силы либо у ньютоновой категории, т. е. «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 при помощи 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 видах 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 гру-

---

[19] Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии, стр. 247.

за служит сила. Из этого вытекает, что поднятый груз также обладает силой. Иначе говоря, пространственную разность весомых 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 весомых 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» [20].

Таким образом, теплота — это сила, эквивалентная движению тела и, следовательно, эквивалентная силе падения. «Как возникает тепло в качестве действия при уменьшении объема и прекращающемся движении, так же исче-

---

[20] Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии, стр. 86.

зает тепло в качестве причины при появлении его действий: движения, увеличения объема, поднятия груза»[21].

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 (точнее, с теорией, изложенной в «Размышлениях о движущей силе огня»,— в дневниках была иная теория). Исходной идеей Майера была идея сохранения вещества и сохранения энергии. Теория теплорода в той форме, в которой ее излагал 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[22] 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 неравномерное распределение тепла, а сама теплота, всякое количество теплоты, независимо от его распределения, эквивалентно работе. Значит, 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 движе-

[21] Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии, стр. 84.

[22] См. Trans. Roy. Soc. Edinb., v. 26, 1849, p. 541. См. также: М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 27.

ние теплорода из котла в конденсатор), но и теплоту, т. е. 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, несколько меньшее количество теплоты. Разность между этими количествами (известное число калорий) эквивалентна работе (числу килограммометров), произведенной в первом случае. Это утверждение Майера (справедливое, как оказалось впоследствии, для идеальных газов) и легло в основу вычисления механического эквивалента теплоты.

## 4. Термодинамика и механика

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 40-е годы, когда Майер высказал свои основные идеи, требовалось только одно: допустить возможность перехода теплоты в движение. 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 макроскопическому, было сущностью теплоты, и, следовательно, эквивалентность теплоты и макроскопической работы означала тождественность причины и действия. Майер выражал новую, специфическую для XIX в. тенденцию, антимеханическую по своей сущности и исторической роли. Именно поэтому открытие Роберта Майера стало основным физическим знаменем «Диалектики природы», направленной каждой своей строкой против всякой метафизики и, в частности, против метафизического увековечения механического естествознания XVIII в.

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, не тождественное 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, не тождественные 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 временно́го — 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 тождест-

венность механических законов, управляющих макроскопическими телами, и законов движения невидимых частиц. Законы эти формулировались при помощи одних и тех же переменных. Уравнение, связывающее макроскопические величины (живые силы микроскопических тел, потерянные 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 при помощи 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 с немеханической величиной, 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, В. 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) с макроскопической динамической переменной (работой), как у Майера, а статистическую связь между механикой обратимых молекулярных движений и поведением ансамблей, статистическую интерпретацию немеханических понятий температуры и включающих ее выражений.

Первое начало термодинамики полностью содержалось в работе Майера 1842 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 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 понятия-

ми служат координаты и изменения координат себетождественных 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 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 объяснялись движением невидимых частиц, но оставалось неясным различие между бескачественным веществом, из которого состоит частица, и окружающим пространством. Само же движение было вполне рациональным понятием: 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 тождественного себе 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, не сводимое (статистически сводимое) к микроскопическим телам, и макроскопическое состояние, не сводимое (статистически сводимое) к микроскопическим состояниям — положениям и скоростям частиц.

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

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» [23]. 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. Старая теория объясняла этот факт уменьшением теплоемкости воздуха при сжатии. Джоуль несколькими простыми экспериментами доказал, что такая концепция не может объяснить количественных соотношений между уменьшением объема при сжатии воздуха и его температурой. Если температура повышается благодаря уменьшению теплоемости, 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

[23] «Основатели кинетической теории материи». Сб. статей. М.—Л., 1937, стр. 34.

Гей-Люссак). С точки зрения новой теории это было легко объяснимо. 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.

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, 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 сохранении движения. «Когда опыты были сделаны, а их результаты... расходились 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» [24].

Это априорное убеждение вытекает у Джоуля, так же как и 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

[24] Э. Мейерсон. Тождественность и действительность. СПб., 1912, стр. 210.

действием человека, но мы обладаем не одним только этим аргументом, как ни должен он казаться решающим всякому уму, свободному от предрассудков»[25].

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 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»[26].

Исходя из этих посылок, Кольдинг считает, что необходимо 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, который он построил, 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.

---

[25] Phil. Mag., v. 23, 1843, p. 445.

[26] Э. Мейерсон. Тождественность и действительность, стр. 212.

Цикл открытий 40-х годов был в известной мере завершен докладом Гельмгольца «О сохранении силы», прочитанным 23 июля 1847 г. в Физическом обществе в Берлине[27]. Гельмгольц исходил 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, 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. «Окончательная задача физических наук о природе заключается в том, чтобы явления природы свести к неизменным притягательным и отталкивательным силам, величина которых зависит от расстояния»[28].

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 произвести 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.

---

[27] См. H. Helmholtz. Über die Erhaltung der Kraft. Leipzig, 1907.

[28] Там же, стр. 6.

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

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

Гельмгольц вместо работы $A$ вводит новую количественную характеристику напряжения $U$, которая по абсолютной величине равна 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. 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 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 — через $v$, 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. 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 притяжения 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» [29].

Понятие силы 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 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

---

[29] H. Helmholtz. Über die Erhaltung der Kraft. Leipzig, 1907, S. 14.

сила, т. е. кинетическая энергия. Тем самым создавалась механика, допускавшая немеханическое обобщение своих понятий. Такое обобщение произошло в 40-е 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. Механика, во-первых, не охватывает всех закономерностей мира и, во-вторых, не только отделена от других областей своими предельными понятиями, но и соединена с ними; наряду с механической существуют другие формы энергии, связанные с механической количественно эквивалентными трансформациями. Принцип сохранения энергии в той форме, какую он получил в 40-е годы, был концом механической 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. 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.

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 Лагранжа идея сохранения всегда входила в эти понятия и соотношения. Теперь задача сводилась к некоторой переформулировке известных законов. В учении о теплоте первое начало термодинами-

ки в эвристическом отношении уступало первенство принципу энтропии. Поэтому наиболее яркую эвристическую роль закон сохранения энергии сыграл в те времена в электродинамике [30].

Доклад Гельмгольца завершил в термодинамике круг открытий 40-х годов. 50-е годы начались в этой области работой Клаузиуса «О движущей силе тепла» [31]. В ней прежде всего опровергается идея перехода неизменного количества теплоты от котла к конденсатору тепловой машины, иными словами, идея Карно. По мнению последнего, тело, проделывающее круговой цикл и возвращающееся в начальное состояние, т. е. к начальным значениям температуры и объема, получает в течение цикла столько же теплоты извне, сколько отдает 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 Гельмгольц называл количеством содержащейся в теле теплоты. Это сумма живых сил молекул и сил напряжения. Клаузиус назвал ее внутренней энергией тела [32].

Во второй половине XIX в. вырастает классическая термодинамика. Клаузиус, В. Томсон, а затем Максвелл, Больцман и Гиббс вместе со многими другими физиками 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 развертывается 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 специфических форм движения.

---

[30] См. М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 194—195.

[31] См. Pogg. Ann., v. 79, 1850, p. 368, 500.

[32] См. Clausius. Abhandl. Über den mechanische Wärmetheorie, I. Braunschweig, 1864, S. 281.

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 80-е 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 физической картины мира. Это было сделано Энгельсом в «Диалектике природы» и в «Анти-Дюринге». В предисловии ко второму изданию «Анти-Дюринга» (1855 г.) 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 [33].

## 5. Определение энергии и трактовка принципа сохранения у Планка

Как раз в том же году, когда Энгельс писал предисловие ко второму изданию «Анти-Дюринга», молодой немецкий физик Макс Планк начал работу, в которой излагается принцип сохранения энергии в его историческом развитии и систематически раскрывается 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. [34], отражает отмечен-

[33] См. Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. Госполитиздат, 1953, стр. 13.

[34] См. M. Planck. Das Prinzip der Erhaltung der Energie, 1887 (русск. пер.: М. Планк. Принцип сохранения энергии. М.—Л., 1938).

ное Энгельсом новое понимание принципа сохранения и представляет большой, причем не только исторический, интерес.

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 Эдинбурге в 1851 г.[35] 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[36]. 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 неизменность одного и того же суммарного механического эквивалента действий, произведенных вне системы, при ее переходе из рассматриваемого состояния в нулевое, независимо от пути такого перехода. Подобная независимость

---

[35] См.: Phil. Mag., v. 4, 1852, p. 3, 522.

[36] См. М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 96.

не предполагается определением, а доказывается экспериментом. Следовательно, принцип сохранения энергии — это не априорное требование, высказанное в определении, а эмпирически полученное соотношение.

Из высказанного таким образом принципа сохранения энергии следует невозможность вечного двигателя[37]. Нулевое состояние определяется произвольно, 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[38]. Энергия — это сумма внешних механических воздействий, производимых процессом перехода системы из состояния $A$ в нулевое состояние $N$. Этому процессу $A \to N$ 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 $A \to B$

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

Если такой переход не дает внешних воздействий, то $[AB] = 0$, и, 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 воздействий, нетривиально:

---

[37] См. М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 102.
[38] См. там же, стр. 104—141.

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» [39].

Переход от «внешнего» определения энергии к «внутреннему», иначе говоря к исследованию существования,

[39] М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 107.

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 60—80-е 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 сходимости[40]. 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.

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

---

[40] См. А. Эддингтон. Пространство, время и тяготение. Одесса, 1923, стр. 154. Изд. 3. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2010.

вида, ...«следовательно, *всякий процесс, происходящий в природе, можно рассматривать как превращение отдельных видов энергии друг в друга...*» [41].

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

В конце XIX в. незыблемость механического объяснения природы была подорвана итогами всего развития классической физики и в особенности итогами развития термодинамики (необратимость) и электродинамики (реальность поля). Планк в 80-е 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 эмпирическую невозможность 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 80-х 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 игнорируется и изменение потенциальной энергии, и кинетическая энергия при движении системы как целого. Остальная энергия, внутренняя, зависит от со-

[41] М. Планк. Принцип сохранения энергии, стр. 119.

стояния 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.

# VI. НЕОБРАТИМОСТЬ

## 1. Сади Карно и 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» [1]. Ощущение необратимости времени основано на наблюдении живой природы и физических процессов. 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 [2]. Обращенное время выглядит абсурдным во всех тех случаях, когда видны физические процессы, сопровождающие движение паровоза. Обобщая подобные примеры, можно сказать, что даже повседневные наблюдения проводят 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, произошло после

[1] См. Э. Мейерсон. Тождественность и действительность СПб., 1912, стр. 227—228.

[2] См. там же, стр. 228—229.

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 больше всего 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? Ограниченна ли она? Остается ли она неизменной при переходе от водяного пара к другим рабочим телам?

Эти вопросы и поставил перед собой Карно. Он писал: «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 маши-

нам, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него ни производилось воздействие» [3].

Вслед за этим Карно говорит о принципиальном различии между механическими и тепловыми двигателями. Первые 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» [4].

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 универсальную 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

[3] С. Карно. Размышления о движущей силе огня. Сб. «Второе начало термодинамики». М. — Л., 1934, стр. 19. Изд. 3. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2009.

[4] Там же.

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 говорил 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, не сводимых 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 при помощи представлений о статистических закономерностях, не сводимых 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 В. Томсона он вообще не был связан с картиной движущихся частиц. Как же могла быть установлена связь между необратимостью и механикой в пределах макроскопической теории? Толь-

ко фиктивным образом, при помощи гипотетического теплорода и представления об уравновешивании неуничтожаемого флюида.

Заключительные страницы трактата Карно показывают 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 применить высокое давление. 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 трубы 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» [5].

Таким образом, принцип энтропии еще очень далек от своей позднейшей кинетической интерпретации. Теплота представляется неуничтожаемой субстанцией. В «Размышлениях о движущей силе огня» Карно разделяет

[5] Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 20.

(с упомянутыми выше оговорками) эту концепцию; поэтому принцип энтропии выражен здесь как принцип необратимого уравновешивания 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» [6].

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» [7].

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

[6] Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 20.
[7] Там же, стр. 21.

ное 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 количество 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» [8].

Если бы можно было получить от теплорода больше механической работы, чем при помощи идеального цикла паровой машины, то можно было бы часть этой силы по-

[8] Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 23.

тратить 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» [9].

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 поразительным по гениальному остроумию, смелости и глубине методологический прием, позволяет Карно вывести идею температурного перепада из невозможности вечного двигателя.

## 2. Понятие энтропии у Вильяма Томсона и Клаузиуса

Отрицательная и чисто количественная характеристика неуничтожаемости движения могла 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 Майера 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 кон-

[9] Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 24.

денсатор попадает при самых идеальных условиях меньше тепла, чем возникает в топке. При этих условиях 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 приписывались 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, Авогадро 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 — 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 исключить кинетические представления из физики и ограничить ее задачи макроскопическим описанием. Но 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 [10], уже в 1850 г. связавшего принцип Карно с механической теорией тепла. Карно сопоставляет работу с теплотой, *перешедшей* от тепла с температурой $\Theta_1$ к телу с температурой $\Theta_2$. Клаузиус же сопоставляет работу с пропорциональной ей теплотой, *исчезнувшей* при таком переходе, т. е. перешедший в работу. Таким образом, в основе идей Клаузиуса лежит *гениальная мысль, к которой* Карно пришел в 30-е 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 неуничтожаемого 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 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.

Решая эту задачу, Клаузиус ввел понятие энтропии — функции состояния системы, которая остается неизмен-

[10] См. Pogg. Ann., v. 79, 1850, S. 368, 500.

ной в случае обратимых процессов. Если же система не находится в тепловом равновесии и в ней происходят необратимые процессы, энтропия возрастает. В этом состоит основная идея работ Клаузиуса «О движущей силе теплоты» (1850 г.) и «Механическая теория тепла» (1876 г.).

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 В. 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 и начинать с исторически исходных проблем. Ко 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 прообразом 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 перехо-

дом 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 для 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 идти в обратном направлении, тепло может переходить от холодного тела к теплому, 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 при помощи 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 сделать 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 инфинитизации принципа необратимости была необходимость непротиворечивой физической теории. Подобные «имманентные» силы развития отражают не частные запросы производства (в данном случае — теплотехники), а результаты общего хода тех-

нического, 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 теплому.* Появляющиеся здесь слова „сама собой" требуют, чтобы быть вполне понятными, еще объяснения, которое дано мною в различных местах моих работ. Прежде всего они должны показывать, что теплота никогда не может накопляться с помощью теплопроводности или излучения в более теплом теле за счет более холодного. Теплота, правда, может перейти от более холодного тела к более теплому; но наш принцип утверждает, что тогда одновременно с этим переходом теплоты от более холодного к более теплому телу должен иметь место и противоположный переход теплоты от более теплого к более холодному 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, должен рассматриваться как *компенсация* перехода теплоты от более холодного тела к более теплому. Пользуясь этим понятием, можно слова „сама собой" заменить словами „без компенсации" и высказать приведенный выше принцип следующим образом: *переход теплоты от более холодного тела к более теплому не может иметь места без компенсации»* [11].

Понятие «компенсация» заставляет Клаузиуса перейти от двигателя к космосу. Такой переход предопределен самим содержанием второго начала термодинамики. Необратимость перехода тепла требует оговорки: «без компенсации», т. е. без другого процесса, связанного с переходом тепла от теплого тела к холодному. Значит, необратимость переходит от одного процесса к другому, охватывает Все-

[11] Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 133—134.

ленную 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... Когда первый основной принцип механической теории теплоты был сформулирован, его, пожалуй, можно было счесть 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» [12].

Спустя год после того как Клаузиус сформулировал второе начало термодинамики, Вильям Томсон придал ему несколько иной характер [13]. Томсон излагает принцип необратимости в форме постулата, отрицающего возможность существования машины, которая использует 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, чтобы вечно получать работу 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

---

[12] Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 133—134.

[13] См. В. Томсон. О динамической теории теплоты. Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 162—174.

резервуара) была исходной формой второго начала термодинамики.

Вильям Томсон распространяет принцип возрастания энтропии на бесконечную Вселенную в целом. Он игнорирует условность инфинизации физических соотношений, которая, вообще говоря, вытекает из обобщения 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, 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. 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» [14]. Перспективу тепловой смерти можно опровергнуть чисто логическим образом — 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.

---

[14] См. К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, 2-е изд., т. 20. М., 1961, стр. 360—362, 599—600.

## 3. Термодинамические идеи Максвелла

Применение статистических понятий в теории теплоты и в теории газов мы встречаем в ряде работ Максвелла, появившихся в 60-е 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 1850 г., Максвелл рассматривал молекулы как упругие тела. В дальнейшем, во второй работе, опубликованной в 1866 г.[15], 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 говорил[16], что основная заслуга Клаузиуса состоит в создании новой области математической физики, в таком физическом обобщении, которое позволило применить математические приемы к изучению систем, состоящих из бесчисленного множества движущихся молекул. Распределив молекулы по группам соответственно их скорости, Клаузиус вместо невозможного наблюдения событий, относящихся к отдельным молекулам, учитывал изменения числа молекул в различных группах, характеризуе-

[15] См. C. Maxwell. On the dynamical theorie of gases. Phil. Mag., v. 35, 1866, p. 129—145, 185—217; v. 37, 1866, p. 390—393.

[16] См. C. Maxwell. On the dynamical evidence of the molecular constitution of bodies. Quart. J. London. Chem. Soc., v. 13, 1875, p. 493.

мых 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, 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, а также в обзорных статьях и лекциях Максвелл всегда подчеркивал необратимость молекулярных процессов. В докладе «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» [17]. Максвелла особенно интересовало соотношение между механическими макроскопическими понятиями и закономерностями термодинамики, с одной стороны, и микроскопическими моделями — с другой. В рамках макроскопической теории 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 макроскопической теории Максвелл оперирует усредненными величинами и статистическими закономер-

---

[17] C. Maxwell. Adress to the Mathematical and Physical Section of the British Association. Brit. Assoc. Rep., v. 40, 1870, p. 1.

ностями 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, лишь тут 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 указывал на классический пример — аналогию между не сводимыми 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 тождественны 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» [18].

---

[18] Дж. К. Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М., 1954, стр. 14.

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 механическим.

## 4. Теория Больцмана

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 рассматривает 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 характеристику 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 назы-

ваемых 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 поршень происходит благодаря суммированию ударов молекул, направленных под различными углами и нанесенных с различной силой. Но при большом числе молекул в среднем на каждый 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 то же 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, 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 маловероятным. 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 газе молекулы в одном месте теснее скучены, в другом рассеяны более редким образом и т. д.» [19].

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 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 превращения 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, наиболее вероятным образом. Напротив, Солнце и Земля имеют 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

[19] Цит. по сб. «Философия науки», ч. I. М.— Пг., 1923, стр. 152.

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 не исследованным способом, о котором мы в наших лабораториях еще не имеем никакого понятия. Продукты этой химической кухни являются предметом борьбы в мире животных» [20].

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.

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.*

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 [21] указал на невозможность произвольно длительного состояния равновесия статистического ансамбля молекул. Представим себе, писал Лошмидт, что распределение скоростей молекул приблизилось к максвел-

---

[20] Сб. «Философия науки», ч. I, стр. 155—156.
[21] См. Wien. Ber., v. 2, 1876, p. 73.

ловскому, 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 [22] и Цермело [23] 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 (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. Вероятность разделения двух диффундировавших друг в друга газов настолько мала, что в реально обозримые сроки такое разделение практически не может наблюдаться, так же как 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.

---

[22] См. Comptes rendus, v. 108, 1889, p. 550.
[23] См. Ann. Phys. Chem., v. 57, 1896, p. 485; v. 59, 1896, p. 793.

в результате работ Альберта Эйнштейна и Мариана Смолуховского[24]. Взвешенные в жидкости так называемые броуновские частицы в результате «невероятных» флюктуаций движутся макроскопически. Результаты наблюдения движения броуновских частиц соответствуют результатам, полученным теоретически Эйнштейном и Смолуховским на основе статистической концепции Больцмана.

Больцман применил понятие флюктуаций 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 флюктуации — 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, все 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 флюктуаций 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 флюктуацией? Именно так Больцман рассматривает известную нам часть Вселенной в известный нам период. Это затухание космической флюктуации. Раньше флюктуация развивалась, т. е. все процессы сопровождались 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

---

[24] Сб. «Второе начало термодинамики», стр. 232—292.

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 $10^{50}$.

Больцман хотел ограничить понятие термодинамического равновесия *сверху*, т. е. не допустить, чтобы это понятие было распространено на слишком большую область — Вселенную, какой мы ее наблюдаем. Ограничение понятия термодинамического равновесия *снизу* 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 *верхний* предел масштабов известного нам мира в качестве *нижнего* 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. Для Вселенной в целом исчезает необратимая эволюция.

Такой сдвиг понятия флюктуации в небольшой области — применение его к галактическим областям — позволил впоследствии рассматривать наблюдение флюктуации при помощи 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.

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 900-х годов. Из этих работ наибольшее значение приобрели книги «Метод геометрического представ-

ления термодинамических свойств вещества» (1873 г.) и «Элементарные принципы статистической механики, разработанные в связи с рациональным обоснованием термодинамики» (1902 г.).

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 единственным 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 тео-

рии тяготения. Поэтому, рассматривая классическую физику как нечто не слишком классическое, как область, в которой подготовлялись предпосылки неклассических теорий, мы с особым интересом 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.

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 данной системы, рассматривает ансамбль систем и стремится установить, как эти системы распределены по различным состояниям и каким образом будет со временем меняться такое распределение.

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 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.

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.

В XX столетии теория энтропии обогатилась одним новым фундаментальным, собственно физическим принципом, а затем вступила в полосу попыток аксиоматизации при помощи 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.

# VII. БЛИЗКОДЕЙСТВИЕ

## 1. Фарадей и идея реальности поля

В классической термодинамике фигурировала статистически континуализированная среда, где движения дискретных частиц макроскопически игнорировались, но сохранялись за кулисами макроскопической сцены. Картина непрерывного распределения средних величин, о котором говорила классическая термодинамика, была необходимой исторической подготовкой картины непрерывного распределения переменных реального поля — представления, фигурировавшего в электродинамике Фарадея — Максвелла.

До Фарадея и Максвелла понятия реального поля не было. Упругий эфир не был полем, а силовое поле, фигурировавшее в теории тяготения, в электростатике и в магнетостатике, не рассматривалось как реальная среда. В физике XVIII—XIX вв. подготовка понятия реального поля происходила двумя путями. Во-первых, механические концепции эфира сталкивались с противоречиями, и это расчищало путь немеханическому представлению о среде как реальном *силовом* поле. Во-вторых, к такому представлению вело развитие формальной концепции поля. Эти две линии пересекались в работах Максвелла. Но уже у Фарадея появилась концепция, отнюдь не формальная и вместе с тем содержавшая в зародыше немеханическую трактовку поля. Она вышла за рамки строгого противопоставления картезианского кинетизма и ньютоновского динамизма. В кинетических моделях эфира рисовали смещения его частиц. Эфир, подобно любому другому веществу, был чем-то движущимся: его элементам можно было приписать вектор скорости. У Фарадея смещения эфира были заменены динамическими деформациями. Но Фарадей пошел дальше. Он отождествил среду, передающую взаимодействие зарядов с силами, придав

последним новый смысл. Более того, Фарадей низвел заряды до ранга вторичных образований. Эта идея не вытекала однозначно из опытов, но она была связана с ними — отчасти обобщала имевшиеся данные, выходя за их рамки, отчасти предвосхищала новые опыты.

Исходным явлением 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 друг на друга 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 Фарадей положил в основу учения об электричестве. Дискретные заряды оказались связанными между собой упругими деформациями непрерывной среды. Заряды не проникают в глубь проводника, так как на его поверхности оканчивается диэлектрическая среда — носительница действительных электрических процессов.

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 дальнодействия, так и в свете учения об эфире при помощи одного и того же математического аппарата — дифференциальными уравнениями, не включающими зависимости от 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 60—70-е годы XVIII в. Но закон носит имя Кулона, который подтвердил его непосредственным измерением. Со-

гласно 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, несущих заданное количество электричества. Нужно вычислить, как распределится заряд и какие силы притяжения и отталкивания возникнут между зарядами. Эти задачи решались с помощью дифференциальных уравнений, описывающих 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 зависимость от времени, дифференциальные уравнения могут оставаться математическим аппаратом теории дальнодействия.

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* $\varepsilon$. Чем больше она превышает единицу, тем значительнее уменьшаются кулоновы силы. Таким образом, закон взаимодействия зарядов приобретает вид

$$F_e = \frac{1}{\varepsilon} \frac{e_1 e_2}{r_{12}^2}.$$

Для эфира $\varepsilon = 1$, для других диэлектриков $\varepsilon > 1$. Аналогично, притяжение и отталкивание магнитных полюсов также зависят от среды. Промежуточная среда характери-

зуется 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 его оси. Такие тела Фарадей назвал диамагнитными, а обычные магнитные тела он впоследствии назвал парамагнитными.

Теория магнетизма, подобно фарадеевой теории электрического поля, не противоречила коренным образом физике дальнодействия. И та и другая пользовались понятием среды, характеризуемой 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 следующему 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» [1]. Ответ Фарадея положительный. Отличие точки зрения Фарадея от взглядов сторонников дальнодействия сформулировал Максвелл во введении к «Трактату об электричестве и магнетизме»: «Фарадей своим мысленным взором видел линии сил, 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» [2].

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 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. Основной факт,

[1] M. Faraday. Phil. Mag., v. 3, 1852, p. 401—428.

[2] J. Maxwell. A treatise on electricity and magnetism. 3-d ed., v. 1. Dover, 1954, p. IX.

который 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» [3].

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 находятся. 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» [4].

---

[3] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. II. М.— Л., 1951, стр. 395.

[4] Там же, стр. 211.

В атомистических концепциях, объясняющих ряд явлений кристаллографии, химии и магнетизма, размеры атомов несущественны.

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 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?» [5].

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 за-

[5] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. II, стр. 400.

нятого ею» [6]. 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 собой 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» [7].

Если сила направлена от данного центра единообразно во все стороны, то 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» [8].

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,

---

[6] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. II, стр. 400—401.

[7] Там же, стр. 402.

[8] Там же, стр. 403.

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 поворотных 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 первоначальной форме. Но дело было сделано, и последующее ограничение механических концепций неизбежно принимало форму развития фарадеевых идей.

Фарадей отождествил силовое поле 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 взаимодействий. 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.

## 2. Оптика и эфир

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, ре-

ального 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 свет рассматривался бы 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. Оптические явления были недостаточным доказательством существования эфира, его гравитационная функция осталась недоказанной. Поэтому существование эфира требовало аргументов, опиравшихся 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 Румфорда как доказательство волновой теории света, как аргумент против теории истечения.

В своей борьбе против ньютонианской корпускулярной теории Юнг хочет опереться на самого Ньютона. Ньютон подчас играл в науке роль, сходную с ролью теологического авторитета 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, которую 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, 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 в случае световых колебаний образуются темные полосы.

Френель развил это представление об интерференции. Он *объяснил 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 со 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 сложней. 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 тяжелым крестом 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 не наделить рожденный ею эфир противоречивыми 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 газообразный 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. По-

этому 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 ни приписывались эфиру, какой бы вид ни 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 реальной 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 и 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 окраска света. 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 приближе-

нии 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. Аналогично 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 спектра, 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 Допплера, 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 Допплера наблюдался и при движении земных источников света.

Эффект Допплера 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 Допплера 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 находятся все время на одном и том же расстоянии, наблюдался эффект Допплера, то можно было бы, не покидая этой системы, утверждать, что она движется, и, таким образом, ее движение демонстрировало бы свой абсолютный характер.

Оставалось проверить, наблюдается ли эффект Допплера при совместном движении источника света и наблюдателя. Для этого нужно было воспользоваться не светом звезд, движение которых от нас не зависит, а земными источниками света. Однако теоретические расчеты показывали, 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, смещение спектральных линий, соответствующее эффекту Допплера, 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 вследствие вращения 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, движущей-

ся 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 направлениях. 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 между двумя точками земной поверхности, то уменьшение времени, необходимого свету для первой части пути, и увеличение времени в обратном направлении не полностью погашают друг друга. Время прохождения света в направлении движения Земли равно $x/(c-v)$, а в обратном направлении — $x/(c+v)$ (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 эфир. Были попытки экспериментально обнаружить величины первого порядка, но они не дали результатов.

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 движение в телах. Эта концепция, как было 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.

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 — рассматривалось 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.

Создавшаяся коллизия противоречила классической механике и ставила под подозрение механическую концепцию эфира. Предположим, что эфир, подобно другим телам, подчиняется ньютоновым законам движения. Предоставленный самому себе, он не приобретает ускорения и в некоторой инерциальной системе 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,— тела, испускающие и поглощающие свет.

Так наметился конфликт между механическим и оптическим релятивизмом. Он нашел свое разрешение в XX в. в теории Эйнштейна, 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 законами движения. Этот конфликт приобрел новую фор-

му после того, как Максвелл объединил оптику и электродинамику в единой теории.

Она и была теорией близкодействия, однозначно вытекавшей из количественных соотношений, многократно подтвержденных впоследствии экспериментом.

## 3. Метод Максвелла

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 дальнодействия также могла дать непротиворечивое истолкование фактов. Фарадей не всегда это понимал [9]. Он думал, что распространение индукции от точки к точке по кривым линиям служит непререкаемым аргументом против дальнодействия. В действительности решающие эксперименты, результаты которых вступили в противоречие с дальнодействием, были сделаны значительно позже. Когда электродинамика середины века в лице Максвелла остановилась на распутье, перед ней еще не было experimentum crucis, показывающего единственно правильную дорогу. Выбор, однако, был сделан.

В статье «О фарадеевых силовых линиях» Максвелл говорит о методе своих исследований в области электромагнетизма. В этой области нужен «такой метод исследования, который на каждом шагу основывался бы на ясных физических представлениях» [10].

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 раз-

---

[9] См. Т. П. Кравец. М. Фарадей и его «Экспериментальные работы по электричеству». Вводная статья к первому тому «Экспериментальных работ», изданному в 1947 г. (М. Фарадей. Экспериментальные работы по электричеству, т. I. М.—Л., 1947, стр. 763—764).

[10] Дж. Кл. Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М., 1954, стр. 12 (дальше: «Избр. соч.»).

личие. 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» [11].

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 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 так же, как на гипотетическую жидкость в смысле, который допускался старыми теориями для объяснения 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» [12].

Чтобы понять смысл аналогии, достаточно вспомнить, 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 такой модели отсутствие инерции у движущихся тел является лишь предельным случаем, когда плотность жидкости уменьшается, а сопротивление растет. В чисто механических (гидромеханических) моделях картезианцев предполагалось, что сравниваемые процессы тождественны по своей природе. У Максвелла условный характер сопоставлений отражает убеждение в существовании материальной среды

---

[11] «Избр. соч.», стр. 16.
[12] Там же, стр. 18.

с немеханическими, не сводимыми к механике свойствами.

Метод Максвелла в известном смысле противоположен методу Лагранжа. В своем «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» [13].

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 механики, 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 ме-

[13] «Избр. соч.», стр. 412—413.

тодами различные по своей природе величины[14]. Негативное предупреждение — один и тот же 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 исследований 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 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.

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»[15].

Максвелл говорит о разделении математических величин на скаляры и векторы и сравнивает созданное Гамильтоном исчисление кватернионов с изобретенной Декартом системой координат. Он рисует перспективу следующего шага в развитии математики, который необходим для анализа новых физических понятий.

---

[14] См. C. Maxwell. Proc. Lond. Math. Soc., v. 3, 1871, p. 224—232. Русск. пер. в кн.: Дж. Кл. Максвелл. Речи и статьи. М.—Л., 1940, стр. 46—54.

[15] «Избр. соч.», стр. 46.

«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» [16].

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» [17].

Максвелл говорит, что открытие веществ, обладающих различными физическими свойствами в различных направлениях, 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) — то, что сейчас обычно называют градиентом скалярной величины, чтобы обозначить результат применения гамильтонова оператора к скалярной функции. «Величина $\nabla P$ есть вектор, указывающий направление, в котором $P$ наиболее быстро уменьшается, и измеряющий

[16] «Избр. соч.», стр. 46—47.
[17] Там же, стр. 49.

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» [18].

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 во вводной 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 точной науки [19]. 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 исчислений. Фарадеевы линии

---

[18] «Избр. соч.», стр. 53.

[19] См. Дж. Кл. Максвелл. Речи и статьи, стр. 71—77.

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» [20].

Сейчас мы знаем и название и содержание математических идей, адекватных физике близкодействия Фарадея — Максвелла. Наиболее очевидная сторона дела — развитие векторного, а затем тензорного анализа. Но в последнем счете с физикой близкодействия 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 близкодействия. Она в конце концов позволила обосновать идею зависимости геометрических свойств пространства от происходящих в нем физических процессов.

Неэвклидова геометрия и мысль о возможности обнаружить отступления свойств реального пространства от эвклидовой 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 только логически, но и непосредственно исторически связаны с электродинамикой.

Подлинная физическая интерпретация идей Лобачевского и Римана была дана через полстолетия после появления теории Максвелла; но исторической основой такой интерпретации было развитие и обобщение классической электродинамики. Если же говорить о 60—70-х годах XIX в., то речь идет лишь о некоторых начальных тенденциях, направленных на создание 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.

---

[20] См. Дж. Кл. Максвелл. Речи и статьи, стр. 77.

Ампер, Нейман, Вебер и другие творцы домаксвелловых 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 [21]. Действительно, «Трактат» Максвелла, отличающийся, по словам Клейна, «массивной реалистичностью» [22], противостоит подобным традициям.

Максвелл как-то говорил, что каждый физик хорошо сделает, если, перед тем как напишет слово «масса» или соответствующий символ, собственноручно подвесит гирю на веревке и толкнет ее. Это полушутливое замечание, иллюстрирующее предметность физического мышления Максвелла, очень характерно для него, однако 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 интересуют, какая именно механическая модель будет привлечена для описания электромагнит-

---

[21] P. Duhem. La Theorie physique, son objet et sa structure. Paris, 1914, p. 20.

[22] F. Klein. Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19 Jahrhundert, Bd 1. Berlin, 1926, S. 242.

ного поля. Неоднозначность таких моделей навевала 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, который привык 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 размышления, и в конце концов читатель убеждается в искусственности и условности теоретических построений, которые вызвали у него раньше такое восхищение» [23].

Пуанкаре говорит, что Максвелл не дает механического объяснения электрических явлений: «...он ограничивается доказательством возможности такого объяснения» [24]. 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 меха-

---

[23] H. Poincaré. Electricité et Optique, vol. 1. Paris, 1890, p. XIV.

[24] Там же, стр. VII.

нического объяснения, так как может существовать бесконечное число других механических систем с другими координатами, также дающими результаты, которые совпадают с опытом.

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. Термодинамика несколько отрывается от механических моделей: 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 90-е 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.

Действительно 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 витка в магнитном поле, в теории Максвелла стягивается в точку, и мы получаем простой закон, связывающий электромагнитное 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.

## 4. Уравнения электромагнитного поля

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 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 научного 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 дальнодействия сменились строгой теорией, предсказавшей эксперименты, в объяснении которых близкодействие и дальнодействие 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 в трудах 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, $\mathbf{B}$ — 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 $\mathbf{D}$. Ток смещения 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

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{d\mathbf{D}}{\partial t}.$$

Подчеркнем, что эксперименты Фарадея и вообще все эксперименты, известные Максвеллу, не давали ему права написать это второе уравнение. Именно в этой гениальной догадке — исходный пункт электромагнитной теории света, волнового уравнения и радикального доказательства близкодействия — картины электромагнитного поля в отсутствие зарядов.

Второе уравнение Максвелла при обобщении понятия тока сохраняет вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{B}}{dt},$$

но теперь означает, что при всяком изменении магнитного поля возбуждается электрическое поле, ток смещения в диэлектриках и ток проводимости в проводниках.

Метод, который привел Максвелла к этим соотношениям, характеризуется синтезом математической характеристики каждой физической величины и физической интерпретации математического символа. Мы приведем строки, очень ярко иллюстрирующие обе стороны этого метода. В шестой главе IV части «Трактата» Максвелл говорит о векторе магнитной индукции: «Отождествляя этот вектор, который 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» [25]. 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 соотношения.

Перейдем теперь к наиболее яркому 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, обратную скорости, и совпадает с обратной величиной скорости света. Такое совпадение 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 дальнодействия. В электродинамике дальнодействия 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 на каждом участке определенной объемной плотностью. Определенная таким образом энергия в случае быстропеременных полей отличается от энергии взаимодействия зарядов. В этом все дело. Электродинамику Максвелла следует считать первой последо-

[25] «Избр. соч.», стр. 458.

вательной теорией близкодействия, потому что она выводит из принципа близкодействия иные количественные соотношения, чем те, к которым приводит принцип дальнодействия. Соответственно реальность поля может быть доказана экспериментально. В основе лежит «четырехмерный» характер близкодействия. Близкодействие здесь означает, что 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 течение 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 дальнодействию, если говорить об уравнениях поля. Близкодействие в классической электродинамике — это *четырехмерное близкодействие*, неэквивалентное дальнодействию, так как оно связано с конечной скоростью распространения деформаций поля.

Четырехмерный характер близкодействия непосредственно вытекает из уравнений Максвелла, из механизма электромагнитных колебаний, из содержания электромагнитной теории света. Здесь нет речи о какой-либо непосредственной связи между отдаленными точками, представление об электромагнитных волнах является чисто дифференциальным, возникновение электрического поля при изменении магнитного и возникновение магнитного

поля при изменении электрического выражаются дифференциальными уравнениями, связывающими *вихри* полей, и распространяются от точки к точке. Но они — это следует из уравнений Максвелла — протекают и от мгновения к мгновению. Возникновение магнитного поля зависит от производной электрического поля по времени, от скорости его изменения во времени. И наоборот, возникновение электрического поля зависит от изменения во времени магнитного поля. Появление переменного, зависящего от времени электрического поля в исходном контуре вызывает появление магнитного поля, т. е. переменное, зависящее от времени магнитное поле. Но переменное поле вызывает возникновение переменного электрического поля. Поэтому пока в первичном контуре будут происходить периодические изменения направления тока или вообще пока в некоторой точке будут иметь место периодические колебания электрического поля, во все стороны будут распространяться электромагнитные волны — периодические колебания в каждой точке пространства, вызывающие колебания той же частоты в соседних точках. Такое представление об электромагнитных волнах, которые Максвелл отождествил со светом, таило в зародыше радикальный отказ от механических концепций эфира.

## 5. Электродинамика движущихся сред

Коснемся основных этапов развития классической электродинамики после Максвелла. Одновременно с ее созданием появилось представление о локализации энергии в пространстве. В 1873—1874 гг. Н. А. Умов определил плотность энергии в произвольной точке среды как частное от деления количества энергии, заключенного внутри бесконечно малого элемента объема, на этот элемент [26]. 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 на некотором участ-

---

[26] См. Н. А. Умов. Избранные сочинения. М.— Л., 1950, стр. 153.

ке 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 ясно, 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.

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 [27].

Планк, рассматривая принцип сохранения энергии как наиболее важный принцип, обобщающий всю физику в целом, называет его мостом, ведущим из механики в электродинамику [28]. 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 в последние годы 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, экспериментально доказавшего существование светового давления. Это открытие вызвало ряд работ, в которых последовательно выводились понятия импульса и массы электромагнитных волн. Подобные понятия и идеи означали постепенное подчинение механики более общим законам электромагнитных явлений и вели к новой физической картине мира.

---

[27] См. М. Планк. Введение в теоретическую физику, ч. III. М.— Л., 1933, стр. 10—28. Изд. 2. М.: URSS, 2004.

[28] См. там же, стр. 9.

Наиболее важным обобщением теоретической физики в 90-е годы была теория Лоренца.

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 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 характеристиками среды; они сводятся к диэлектрической поляризации и молекулярным токам. Поэтому Лоренц рассматривает величины $\varepsilon$ и $\mu$ как статистические средние по большому числу 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 сказанного. Она ограничивается выявившейся впоследствии недостаточностью корпускулярного микроскопического представления об электроне. Необходимость континуально-волнового аспекта в теории электрона была доказана только в 20-е 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 движу-

щихся 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.

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. 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.

# VIII. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

## 1. Электромагнитная картина мира

Естествознание XX столетия нарисовало новую картину мира, которая в большей мере отличается от классических представлений XIX в., чем последние отличались от механического естествознания XVII—XVIII вв. Сначала казалось, что дело сводится к переходу от механической картины мира к электромагнитной. Впоследствии выяснилось, что новая картина мира имеет более сложный характер. Концепции, первоначально сформулированные на основе данных электродинамики, приобрели потом более общий смысл и были выведены из самых общих представлений о пространстве, времени, движении и веществе. Такая эволюция чрезвычайно характерна для физики XX столетия — для генезиса теории относительности и теории квант.

Первоначальной основой релятивистских и квантовых идей (вернее, идей, переосмысление которых привело к релятивистским и квантовым представлениям) было развитие электродинамики. Это развитие приводило к мысли о возможном объяснении в последнем счете всех явлений природы электромагнитными процессами как исходными и наиболее глубокими. Электрические заряды казались кирпичами мироздания, а электромагнитные поля — первичными взаимодействиями элементов вещества, из которых складываются другие, в том числе собственно механические взаимодействия. Однако этот замысел оказался (если еще раз вспомнить удивительное по емкости и точности замечание Бора) недостаточно «безумным». Замена частиц и взаимодействий, фигурировавших в механической картине мира, иными по своей природе элементарными частицами и взаимодействиями была недостаточно радикальным преобразованием физических идей.

Эмбриональная стадия развития электромагнитной картины мира (в целом последняя так и не вышла из эмбрионального состояния) сохранила свойственное классической физике противопоставление континуальной среды и дискретного вещества. В качестве среды фигурировали либо континуальный эфир, либо континуальные динамические взаимодействия, распространявшиеся в непрерывном пустом пространстве. Существовали концепции, выводившие существование дискретных частиц из свойств континуальной среды, но не эти концепции цементировали классическое представление о природе. Идеалом классической науки было представление о мире, в котором нет ничего, кроме движения и взаимодействия дискретных масс.

В набросках электромагнитной картины мира, столь частых в конце 90-х и в начале 900-х годов, этот идеал в общем сохранился, только теперь массу стали считать зависящей от электромагнитных взаимодействий частиц. Это было только началом эволюции. Вскоре теория относительности объяснила парадоксальные результаты экспериментов, относившихся к электродинамическим процессам в континуальной среде, на основе новых фундаментальных постулатов о пространстве и времени.

Но *исторически* исходным пунктом этого переосмысления было представление об электромагнитной природе исходных взаимодействий между телами и об электрических зарядах как о кирпичах мироздания.

В самом начале 80-х годов Гельмгольц в речи, посвященной Фарадею, объяснил фарадеевы законы электролиза с помощью представления о неделимых частицах отрицательного электричества. Если каждый атом вещества, участвующий в электролитическом процессе, несет неделимый далее электрический заряд, то отсюда легко можно получить пропорциональность количества электричества и количества выделяющегося при электролизе вещества. Затем Дж. Стоней писал об электронах — элементарных зарядах. В конце века широкие и систематические исследования прохождения электричества через разреженные газы создали предпосылки для открытий, преобразовавших учение об электричестве и поставивших в центр его представление об электроне. В результате работ Дж. Дж. Томсона и других выяснилось, что открытые еще в 50-е годы катодные лучи отклоняются магнитным и электрическим полем, перпендикулярным к направлению лучей, так же как отрица-

тельно заряженные тела. Было высказано предположение, что катодные лучи представляют собой поток дискретных частиц электричества. В дальнейшем удалось не только доказать это предположение, но и определить массу и заряд этих частиц. Масса каждой частицы примерно в 1840 раз меньше массы атома водорода, а заряд оказался равным $4{,}77 \cdot 10^{-10}$ эл.-ст. ед.

В 90-е годы представления об атомах и электронах сводились к следующему. Положительное электричество распределено равномерно по объему атома (Дж. Дж. Томсон). Вместе с тем атом включает некоторое число электронов, уравновешивающих положительный заряд. В диэлектриках электроны не отделяются от атомов и лишь немного смещаются, когда атом оказывается в электрическом поле. Напротив, в электролитах и проводящих газах атомы теряют или приобретают некоторое число электронов, становясь ионами — заряженными атомами, и движутся в электрическом поле. В металлах электроны движутся независимо от атомов. Представление о дискретных электрических зарядах и их связи со структурой вещества было исходным пунктом создания и развития атомной физики.

Для генезиса теории относительности преимущественное значение имела другая сторона вопроса — проблема взаимоотношений электронов с эфиром. Лоренц, как об этом подробнее рассказывалось в предыдущей главе, предположил, что эфир представляет собой абсолютно неподвижную среду. В ней движутся электроны. Электрический ток целиком сводится к движению электронов. Электрические и магнитные силы действуют только на заряды, эфир не подвергается никаким воздействиям, остается неподвижным, и всякий электрический ток — это в сущности конвекционный ток, движение электронов. Поэтому величины диэлектрической постоянной $\varepsilon$ и магнитной проницаемости $\mu$ теряют тот смысл, который они имели в электродинамике Максвелла. Ведь среда, в которой действуют электрические и магнитные силы, среда, для которой диэлектрическая постоянная и магнитная проницаемость были исходными, первичными понятиями, ныне оказалась собранием плавающих в эфире отдельных зарядов. Для эфира $\varepsilon$ и $\mu$ равны единице, для отдельных электронов эти величины не имеют смысла, а для больших собраний электронов они сохраняют смысл в качестве статистических средних по большому числу дипольных электрических

и магнитных моментов. В зависимости от этих первичных явлений, от сдвига или круговых движений электронов тела, состоящие из элементарных зарядов, обладают той или иной диэлектрической постоянной и магнитной проницаемостью. Тела обладают также определенной проводимостью σ. Проводимость — также не исходное, а вторичное понятие: она связана с макроскопическим усреднением длин свободных пробегов электронов.

Представление о неподвижном эфире, в котором плавают дискретные частицы материи — элементарные электрические заряды, позволило объяснить множество электродинамических и оптических явлений. Лоренц пошел значительно дальше Френеля в утверждении неподвижности эфира: он полностью отказался от какого бы то ни было увлечения эфира движущимися телами. Из теории Лоренца вытекает, что движение тел в эфире не изменяет сколько-нибудь заметно электродинамических и оптических процессов, так как изменения этих процессов пропорциональны не скорости движения тел, деленной на скорость света $v/c$, а квадрату этой величины, $v^2/c^2$. Следовательно, эфирный ветер можно было бы обнаружить лишь очень тонкими экспериментами. Если не говорить об электродинамических и оптических процессах, зависящих от $v^2/c^2$, то теория Лоренца не допускала возможности обнаружить движение зарядов относительно эфира. Ход явлений, согласно этой теории, определялся относительными сдвигами зарядов, изменением расстояний между телами, погруженными в эфир.

Таким образом, представление об эфире как абсолютном теле отсчета, поставившее эфир на место ньютонова пустого абсолютного пространства, могло уживаться с некоторым условным (для явлений, зависящих от первой степени $v/c$) электродинамическим релятивизмом, с признанием, что движение относительно эфира не может повлиять на результаты оптических или вообще электромагнитных измерений величин первого порядка, не может быть обнаружено такими измерениями. Теория Лоренца исключала электродинамический релятивизм второго порядка: измерения электромагнитных величин, зависящих от $v^2/c^2$, должны были обнаружить абсолютное движение — движение тел относительно неподвижного эфира.

Забегая вперед, отметим, что такие измерения дали отрицательный результат, и благодаря этому в электродина-

мике утвердилось представление об относительности, уже не ограниченной первым порядком величин. Но при этом пришлось перестроить основы классической механики. Почва для такого переворота была в некоторой мере подготовлена развитием электромагнитной картины мира и, в частности, попытками дать электродинамическую интерпретацию основных понятий механики, в частности понятия массы.

Еще в 1881 г. Дж. Дж. Томсон предположил, что инерция электромагнитного поля прибавляется к инерции тела и поэтому заряженное тело обладает большей массой, чем незаряженное. Разность между массой заряженного и незаряженного тела Томсон назвал «кажущимся приростом массы», а впоследствии она получила наименование электромагнитной массы.

Электронная теория положила начало новой полосе в развитии представлений об электромагнитной массе. Появилась крайне радикальная мысль о возможности свести всю массу элементарных частиц вещества, электронов, к электромагнитной массе. Эта мысль в общем соответствовала имевшимся тогда сведениям о заряде, размерах и массе электрона. Впоследствии она стала еще более правдоподобной. Экспериментальные данные об отношении заряда электрона к его массе были получены при изучении отклонения катодных лучей в электрических и магнитных полях. Подобным же образом изучали поведение бета-лучей радия, т. е. электронов, движущихся с громадной скоростью, сопоставимой со скоростью света. Оказалось, что отношение заряда электрона к массе зависит от скорости. Заряд не меняется, значит меняется масса электрона. Это легко понять, если масса электрона имеет электромагнитную природу. Чтобы получить количественные представления о зависимости электромагнитной массы от скорости, нужно знать распределение заряда в электроне. Абрагам в 1903 г. высказал предположение о твердом шарообразном электроне и равномерном распределении заряда по его объему либо по поверхности. Он вычислил вытекающую из такого предположения зависимость массы электрона от скорости, и результаты оказались близкими к экспериментальным данным. Вскоре появились гипотезы об электромагнитной природе всей массы не только электронов, но и атомов и вообще всех тел природы — наметился переход к электромагнитной картине мира.

Философские выводы из начавшейся революции в физике были сделаны В. И. Лениным в книге «Материализм и эмпириокритицизм». Ленин подчеркивал характерную мысль: классическая механика остается справедливой при изучении сравнительно медленных реальных движений, а новая физика представляет собой снимок с гораздо более быстрых реальных движений [1]; законы механики оказываются частным случаем более общих электродинамических законов [2]. Ленин говорил о действительном философском смысле этих физических обобщений. Чем решительнее и смелее наука переходит на новую ступень в своем отображении объективной действительности, чем непривычнее выглядят новые представления по сравнению со старыми, тем плодотворнее для научного прогресса философские идеи марксизма. Они опираются на развивающуюся науку, они не дают априорных, догматических указаний и окончательных ответов на вопрос, какими должны быть конкретные физические представления о материи, они утверждают ее объективную реальность и познаваемость и предоставляют науке на основе экспериментальных данных, в живом переплетении сменяющих друг друга, дополняющих друг друга, конкретизирующих и обобщающих друг друга физических концепций все точнее отражать объективную реальность. Разумеется, такая антидогматическая позиция не может быть поколеблена научным прогрессом, углублением физических знаний, выяснением относительности и ограниченности понятий, которые раньше казались абсолютными и неизменными. «Ибо *единственное* „свойство" материи, с признанием которого связан философский материализм, есть свойство *быть объективной реальностью*, существовать вне нашего сознания» [3].

Этот тезис, направленный против махизма, вместе с тем противостоит всякому догматическому отождествлению материализма с определенными историческими преходящими, подлежащими дальнейшему уточнению, конкретизации и обобщению физическими представлениями о материи. Такая антидогматическая позиция не может устареть, напротив, она укрепляется развитием физических идей

[1] См. В. И. Ленин. Полное собрание сочинений, 5-е изд., т. 18. М., 1961, стр. 280—281.
[2] См. там же, стр. 276.
[3] Там же, стр. 275.

и сама стимулирует такое развитие. С этой позиции Ленин видел не только генезис электромагнитной картины мира, но и дальнейший переход к более сложным представлениям. Ленин писал, что материализм отнюдь не утверждает «...обязательно „механическую", а не электромагнитную, не какую-нибудь еще неизмеримо более сложную картину мира, как *движущейся материи*» [4]. Дальнейшее развитие физики показало, что естественнонаучная революция ведет к построению такой неизмеримо более сложной по сравнению с электромагнитной картины мира. Обобщение науки, которое исходит из ее развития, рассматривает науку в ее развитии, принципиально отбрасывает априорные схемы, отказывается от метафизического абсолютизирования тех или иных физических теорий и вместе с тем видит в науке процесс последовательного приближения к абсолютной истине, такое обобщение раскрывает перспективы науки и становится активной движущей силой научного прогресса.

Ньютонова механика с ее абсолютным пустым пространством, лоренцова картина неподвижного эфира, теория относительности Эйнштейна рисовали — с различной и возрастающей полнотой и точностью — объективный, материальный мир. Переход от одной научной картины мира к другой происходил потому, что ньютонова механика, а затем и лоренцова электродинамическая картина материи и ее движения перестали соответствовать сумме экспериментально установленных фактов.

## 2. Мировоззрение Эйнштейна

Теория относительности Эйнштейна не могла быть результатом чисто стихийного стремления к исключению из научной картины мира антропоморфных элементов и чисто стихийной готовности посягнуть на традиционные представления. Для теории Эйнштейна характерно сочетание необычайной парадоксальности исходных утверждений с объективной достоверностью этих утверждений. Именно это впечатление парадоксальности самого бытия, а не тех или иных мысленных конструкций приковало к теории относительности внимание очень широких кругов. Речь

---

[4] В. И. Ленин. Полное собрание сочинений, 5-е изд., т. 18 М., 1961, стр. 296.

шла о радикальном пересмотре основных понятий, ведь теория Эйнштейна отличалась от других попыток истолкования новых экспериментов именно своим систематическим характером, тем обстоятельством, что в ней не было частных гипотез, выдвинутых *ad hoc*, а все вытекало из фундаментальных и весьма естественных постулатов, относящихся к пространству, времени и движению. Подобная теория требовала от ее творца весьма четких исходных эпистемологических представлений о природе научных знаний и соотношений логических и экспериментальных путей в науке.

Для Эйнштейна научные знания — это отображение действительности, отображение объективной гармонии бытия, объективного ratio, охватывающего Вселенную и состоящего в каузальной связи всех процессов природы. Спинозовское «причина или разум, разум или причина» («causa sive ratio, ratio sive causa») было исходным представлением о мире и науке. Рационализм Эйнштейна был близок в наибольшей степени к идеям Спинозы — к высшему взлету рационалистической мысли XVII столетия, века, когда разум еще не претендовал на исчерпывающее знание истины в последней инстанции и видел основу своего суверенитета в бесконечном приближении к истине.

Для Эйнштейна научная истина — это то, что соответствует бытию, независимому от познания. «Уверенность в существовании внешнего мира, независимого от познающего субъекта, лежит в основе всего учения о природе»,— писал Эйнштейн в статье «Влияние Максвелла на эволюцию понятия физической реальности» [5].

Несмотря на годы усердного штудирования трудов Юма, Эйнштейн в конце концов увидел в воззрениях английского философа начало позитивизма, который в конце XIX в. в лице Маха хотел ограничить задачу науки феноменологическим описанием наблюдений. В статье о философии Бертрана Рассела [6], написанной для посвященного Расселу тома «Library of Living Philosophers», Эйнштейн говорит, что Юм «создал опасный для философии, появившийся после его критического анализа фатальный страх

---

[5] A. Einstein. Comment je vois le monde. Paris, 1934, p. 194.

[6] См. A. Einstein. Ideas and Opinions. New York, 1954, p. 18—24.

перед „метафизикой“, который стал болезнью современного философствования в духе эмпиризма, эта болезнь — двойник того раннего философствования, которое хотело пренебречь опытом и отделаться от всего, что дано чувственным восприятием».

Феноменологическая традиция позитивистской философии объявила «метафизикой» все находящееся за пределами «опыта» в смысле ощущений человека, все, что служит объективной причиной ощущений. Соответственно позитивисты требовали устранения из науки понятий, выходящих за рамки «чистого описания». «Но это требование,— пишет Эйнштейн в той же статье,— если его твердо придерживаться, исключает в качестве „метафизического“ любую мысль. Для того чтобы мышление не деградировало в метафизику или в пустой разговор, нужно только, чтобы предложения, выводимые из данной системы понятий, были достаточно тесно связаны с чувственным опытом».

Под «ранним философствованием», которое хотело бы «отделаться от всего, что дано чувственным восприятием», Эйнштейн понимал платоновскую традицию, кантианскую концепцию априорных форм познания и конвенционализм — представление о научных истинах как об условных соглашениях.

Отношение Эйнштейна к Маху может быть определено однозначным и простым образом, если иметь в виду итоговые оценки и действительные философские идеи, «работавшие» при поисках новой физической теории. Это отношение было отрицательным. В историко-биографическом аспекте вопрос несколько сложнее: оценки менялись, первоначально Эйнштейн сочувствовал идеям Маха, но потом выступил против них. В автобиографии 1949 г. Эйнштейн пишет о критике ньютоновской концепции абсолютного пространства в «Механике» Маха и добавляет: «...в мои молодые годы на меня произвела сильное впечатление также и гносеологическая установка Маха, которая сегодня представляется мне в существенных пунктах несостоятельной».

Эволюция отношения к взглядам Маха переплеталась с разработкой теории относительности и была тесно связана с такой разработкой. Итоговая оценка была высказана в очень резкой форме в 1920 г. После доклада в Париже на заседании Французского философского общества на

вопрос Мейерсона об отношении к Маху Эйнштейн ответил, что считает Маха «жалким философом» [7].

Протест против феноменологического «чистого описания» и против всех форм априоризма и конвенционализма соответствовал положительной программе Эйнштейна. Познание может проникнуть за пределы ощущений и построить адекватный образ их объективной причины — независимого от познания внешнего мира. Если познание приходит к выводам, которые непосредственно не содержались в наблюдениях и *после этого* выводы подтверждаются новыми наблюдениями, значит познание не ограничено сферой явлений и находит объективную истину. Такие факты из истории науки, как открытие планеты Уран, существование которой не вытекало феноменологически из наблюдений, служат для Эйнштейна аргументом против ессе percipi Беркли [8].

Этот путь — от наблюдаемых явлений к непосредственно не вытекающим из них выводам и затем проверка выводов новыми наблюдениями — является, по мнению Эйнштейна, основным путем научного познания. Только в связи с указанной концепцией могут быть правильно поняты неоднократные заявления о «свободной деятельности сознания» и о необходимой связи научных понятий с принципиально возможной экспериментальной проверкой. Иногда в эпистемологических экскурсах Эйнштейна, связанных с разработкой и изложением теории относительности, видели нечто близкое к «чистому описанию». Эйнштейн требовал, чтобы понятиям приписывали физический смысл, если их в принципе можно сопоставить с результатами наблюдений, и, например, движение по отношению к эфиру не выдерживало такого требования. Напротив, позднейшие выступления Эйнштейна против представления об основных законах мира как о статистических законах сближали с априорными представлениями, игнорирующими результаты эксперимента. В действительности требование физической содержательности математических абстракций было развитием максвелловского метода, о котором шла речь в главе, посвященной принципу близко-

---

[7] E. Meyerson. La deduction relativiste. Paris, 1925, p. 62.

[8] См. A. Einstein. Reply to criticisms. В сб. «Albert Einstein. Philosopher — Scientist». Ed. by A. Schilpp. New York, 1951, p. 669.

действия. С эпистемологической точки зрения это требование исключало чисто логическое выведение физических констатаций из «априорных форм разума» или из «условных соглашений». В свою очередь «свободная деятельность познания» означала у Эйнштейна только одно: свободу от феноменологической ограниченности. Действительный смысл заявлений Эйнштейна о связи с экспериментом («физической содержательности») и заявлений о «свободной деятельности познания» может быть понят лишь в их связи между собой. При этом явная двусмысленность терминологии не может помешать пониманию действительного смысла эпистемологических позиций Эйнштейна: этот смысл раскрыт основным творческим подвигом мыслителя — созданием теории относительности. Мы это увидим, взглянув несколько ближе на выдвинутые Эйнштейном критерии выбора научной теории.

Физическая содержательность научной теории гарантируется ее согласием с экспериментом.

«Но насколько очевидным кажется это требование само по себе, настолько тонким оказывается его применение. Дело в том, что часто, если не всегда, можно сохранить данную общую теоретическую основу, если только приспособлять ее к фактам при помощи более или менее искусственных дополнительных предположений. Во всяком случае, в этом первом критерии речь идет о проверке теоретической основы на имеющемся опытном материале» [9].

Кроме такого «внешнего оправдания» Эйнштейн выдвигает второй критерий — естественность теории, минимальное число допущений, специально сделанных, чтобы объяснить некоторое число отдельных фактов. С точки зрения общих принципов, лежащих в основе картины мира, такие допущения представляются произвольными.

«Второй критерий можно кратко характеризовать как критерий „внутреннего совершенства" теории, тогда как первый относится к ее „внешнему оправданию". К „внутреннему совершенству" теории я причисляю также и следующее: теория представляется нам более ценной тогда, когда она не является логически произвольным образом выбранной среди приблизительно равноценных и аналогично построенных теорий».

---

[9] А. Эйнштейн. Творческая автобиография. «Усп. физ. наук», т. 59, вып. 1, 1956, стр. 74.

Мы увидим сейчас, что классическая физика не обладала в конце XIX и в начале XX в. «внешним оправданием». Электродинамика и оптика привели в своем развитии к результатам, несовместимым с основами классической физики. Правда, существовали теории, которые давали этим результатам классическое истолкование, но такие теории не обладали «внутренним совершенством».

Указанный критерий вытекал из уверенности Эйнштейна в универсальной гармонии мироздания, в существовании универсальной связи всех процессов природы. Гармония мира выражается в каузальной связи, которая нигде и никогда не обрывается. Поэтому в картине мира в идеале не должно быть эмпирических констант, которые вводятся без дальнейшего обоснования. В идеале каждая константа логически вытекает из некоторых теоретических представлений. В 1949 г. Эйнштейн писал о физических константах: «Относительно этих последних мне бы хотелось высказать одно предложение, которое нельзя обосновать пока ни на чем другом, кроме веры в простоту и понятность природы. Предложение это — следующее: таких произвольных постоянных не существует. Иначе говоря, природа устроена так, что ее законы в большой мере определяются уже чисто логическими требованиями настолько, что в выражения этих законов входят только постоянные, допускающие теоретическое определение (т. е. такие постоянные, что их численных значений нельзя менять, не разрушая теории)» [10].

В I главе этой книги («Гелиоцентризм и генезис механического объяснения природы») говорилось о попытке Кеплера вывести эмпирические константы — радиусы планетных орбит — из некоторой логической схемы — соотношения между радиусами сфер, описанных и выписанных в правильные многогранники. Но через три столетия эмпирические константы тоже нельзя было исключить из картины мира, константы, логически выведенные из более общих допущений, оставались идеалом, приближение к которому было эвристическим принципом науки.

Таким же эвристическим принципом было выведение из возможно более общих постулатов тех отрицательных результатов, к которым приводили неоднократные экспериментальные попытки. В XVIII в. пытались построить

[10] «Усп. физ. наук», т. 59, вып. 1, 1956, стр. 93.

вечный двигатель. Неудача таких попыток была сформулирована в виде общего правила, одного из тех правил, которые впоследствии были названы «постулатами бессилия». Термодинамика вывела этот постулат из общей идеи эквивалентности различных видов энергии, и после этого отрицательный «постулат бессилия» стал положительным законом, утверждающим не только количественное сохранение, но и качественное превращение энергии.

Аналогичную эволюцию претерпела экспериментально установленная невозможность зарегистрировать движение, отнесенное к эфиру. Систематическое объяснение такой невозможности было достигнуто Эйнштейном в теории, которая исключала регистрацию абсолютного движения на основе весьма общей переформулировки исходных законов движения.

В одном из писем Эйнштейн говорил:

«Если бы неподвижный, заполняющий все пространство световой фильтр действительно существовал, к нему можно было бы отнести движение, которое приобрело бы абсолютный смысл. Такое понятие могло быть основой механики. Попытки обнаружить подобное привилегированное движение в гипотетическом эфире были безуспешными. Тогда вернулись к проблеме движения в эфире и теория относительности сделала это систематически. Она исходит из предположения об отсутствии привилегированных состояний движения в природе и анализирует выводы из этого предположения. Ее метод аналогичен методу термодинамики, последняя является не чем иным, как систематическим ответом на вопрос: какими должны быть законы природы, чтобы вечный двигатель оказался невозможным» [11].

## 3. Постоянство скорости света

Первые опыты, доказавшие отсутствие эфирного ветра, были сделаны почти за 25 лет до создания теории относительности. Они оказались в центре внимания после многократных повторений и в тот момент, когда абсолютное пространство приобрело физическую конкретность в картине неподвижного эфира и существование абсолютного прост-

[11] A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine. Paris, 1956, p. 19.

ранства и абсолютного движения могло стать объектом экспериментальной проверки.

В 1881 г. Майкельсон произвел наблюдения, отличающиеся чрезвычайно высокой точностью, позволяющей обнаружить эффекты, зависящие от второй степени отношения механической скорости движения системы к скорости света.

В интерферометре Майкельсона световой луч разделяется на два луча: один проходит определенный путь туда и обратно в продольном направлении к движению Земли, другой — такой же по длине путь в поперечном направлении. Движение света в продольном направлении продлится несколько больше, чем в поперечном направлении,— на небольшую величину, пропорциональную квадрату отношения скорости Земли к скорости света в эфире. Существование такой разности и должен был обнаружить опыт Майкельсона, повторенный в 1887 г. Майкельсоном и Морлеем и впоследствии неоднократно повторявшийся при последовательном усовершенствовании прибора. Прибор включал множество сложных устройств, обеспечивающих его точность и надежность. Можно было рассчитывать на обнаружение ничтожных различий во времени распространения света в двух взаимно перпендикулярных направлениях, если такие различия существуют. Результаты всех опытов оказались отрицательными.

Наряду с применением интерферометра были проделаны и другие эксперименты, в частности эксперименты с электрическими конденсаторами и проводниками. Троутон и Нобл в 1903 г. подвешивали плоский конденсатор под углом к движению Земли. Если эфир не увлекается Землей, то движение конденсатора должно вызвать силы, стремящиеся повернуть плоскость конденсатора параллельно направлению движения. Троутон и Нобл проверяли, не скажется ли поворот проводника из поперечного положения относительно движения Земли в продольное на вызванных таким образом силах. Опыты показали, что движение Земли не сказывается на электродинамических явлениях. Эксперименты, показавшие отсутствие эфирного ветра, представляют собой experimentum crucis для учения о неподвижности эфира. Неподвижный эфир был осужден. Но вернуться к гипотезе увлечения тоже нельзя было.

Чтобы еще раз представить себе с максимальной наглядностью значение оптических, или, что то же самое,

электродинамических, экспериментов для учения о движении в эфире, приведем следующий пример, в котором не будет речи об экспериментальной технике и количественных расчетах и внимание сосредоточится на основном принципиальном вопросе. Сравним две гипотезы: 1) тела полностью увлекают эфир с собой и 2) тела не увлекают эфир или увлекают его не полностью, так что можно говорить о смещении тел по отношению к эфиру. Представим себе прямолинейно движущуюся систему с источником света, движущимся вместе с ней, и двумя экранами, расположенными один впереди источника света, а другой — на том же расстоянии сзади. Экраны, так же как и источник света, движутся вперед вместе с системой. Если эфир полностью принимает участие в движении системы, то скорость света в этой системе одинакова во всех направлениях и не зависит от движения системы. Световой сигнал достигает обоих экранов одновременно. Однако во внешней системе, относительно которой движется данная, скорость света представится неодинаковой. Если данная система — плывущий вдоль берега корабль, то луч подвешенного в центре фонаря долетит до экрана на корме так же быстро, как и до экрана на носу корабля, подобно пассажиру, идущему от центра корабля к носу и к корме. Но по отношению к берегу свет будет быстрее двигаться в направлении движения корабля, как и пассажир, идущий по палубе в этом направлении. Соответственно правилу сложения скоростей свет, идущий по движению корабля, будет двигаться по отношению к берегу со скоростью 300 тыс. *км/сек* плюс скорость корабля, а в обратном направлении — 300 тыс. *км/сек* минус скорость корабля. Таким образом, если при движении материальная система увлекает эфир, заключенный между источником света и экранами, то скорость света будет одной и той же в данной системе и различной по отношению к внешней системе.

В свое время Физо (1851 г.) исследовал, увлекают ли тела эфир при своем движении. Он направлял луч света по трубе с текущей водой. Оказалось, что вода лишь частично увлекает эфир. Опыт Физо, в котором вода была внутренней, а труба внешней системой, показал, что нельзя говорить о полном увлечении эфира, что тела смещаются по отношению к эфиру. Отсюда вытекает второе предположение. Допустим, что эфир не увлекается материальными телами и наша система со своим источником света

и двумя экранами смещается по отношению к эфиру. Тогда для внешней системы скорость света будет постоянной и независимой от движения источника света и экранов. В самой движущейся системе свет дойдет до переднего экрана позже: ему придется догонять экран, и по правилу сложения скоростей скорость света в движущейся системе окажется неодинаковой: в сторону переднего экрана она будет равна 300 тыс. *км/сек* минус скорость системы, а в обратном направлении — 300 тыс. *км/сек* плюс скорость системы.

Таким образом, увлекают тела эфир или не увлекают, скорость света должна была оказаться различной: в первом случае относительно внешней системы, во втором — относительно системы, движущейся вместе с источником света. Экспериментальной основой специального принципа относительности явился тот факт, что ни то, ни другое предположение не подтвердилось. Свет распространяется с одинаковой скоростью как по отношению к движущейся координатной системе, так и по отношению к внешней, относительно которой движется данная система.

Эксперименты, тщательно поставленные и многократно проверенные, заставили физиков отказаться от гипотезы увлечения, а затем и от неподвижного эфира.

Наиболее важная в историческом отношении попытка объяснить результаты Майкельсона и других, сохранив при этом неподвижный эфир и различную скорость света в движущихся относительно друг друга системах, принадлежала Лоренцу. В 90-е годы Лоренц разработал гипотезу, которую еще раньше высказывал в своих лекциях Фитцджеральд. Согласно этой гипотезе, скорость света различна в системах, движущихся относительно друг друга. Это обстоятельство можно было бы зарегистрировать при помощи оптических наблюдений, если бы время продольного и поперечного движения света в интерферометре не выравнивалось сокращением продольных масштабов в системах, движущихся относительно эфира. В статье Лоренца «Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света» [12] дана наиболее полная формулировка гипотезы сокращения. Лоренц исхо-

[12] См. H.-A. Lorentz. Proc. Acad. Amsterdam, v. 6, 1904, p. 809. Русск. пер. см. в кн. «Принцип относительности». Сборник работ классиков релятивизма. Л., 1935, стр. 16—48.

дит из основных уравнений электронной теории и вводит дополнительную гипотезу: электроны, которые в состоянии покоя можно считать шарами, при поступательном движении относительно эфира деформируются, их продольные размеры уменьшаются, причем уменьшение пропорционально отношению скорости движения электронов к скорости света. Иными словами, электроны-шарики преобразуются в эллипсоиды, малые оси которых лежат в направлении движения. Далее Лоренц принимает, что силы, действующие между незаряженными частицами и между незаряженными частицами и электронами, изменяются при движении относительного эфира таким же образом, как и электрические силы. Следовательно, все тела испытывают такую же деформацию, как и электроны.

Лоренцова формула преобразования продольных размеров показывает, в какой мере эти размеры сокращаются в зависимости от скорости движения тел в эфире. Эти формулы приводят к заключению, что сокращение размеров тел компенсирует изменение скорости света. Формулы преобразования продольных линейных масштабов и времени, введенные Лоренцом, были уточнены Эйнштейном и Пуанкаре и легли в основу теории относительности. Но в самой работе Лоренца еще не был высказан принцип относительности, противопоставленный идее неподвижного эфира. Лоренц утверждал, что продольные размеры тела, движущегося относительно неподвижного эфира, сокращаются по сравнению с размерами того же тела, покоящегося в неподвижном эфире. Таким образом, движение в неподвижном эфире остается, оно вызывает определенные электродинамические эффекты, но проявляется оно одновременно и в сокращении масштабов, и в изменении скорости света, так что эти результаты движения в эфире компенсируют друг друга. Движение деформированных тел остается абсолютным движением, движением в абсолютном пространстве, в той электродинамической форме, какую Лоренц придал абсолютному пространству. Лоренц доказывал также, что время течет быстрее в движущихся системах, по сравнению с временем, измеряемым в системах, покоящихся относительно эфира, т. е с «истинным» временем.

В 1912 г. Лоренц в примечании к своей статье 1904 г. писал: «Заслуга Эйнштейна состоит в том, что он первый высказал принцип относительности в виде всеобщего,

строго и точно действующего закона» [13]. Это соответствует действительности. Но следует заметить, что Пуанкаре независимо от Эйнштейна в статье, опубликованной в начале 1906 г., высказал принцип относительности в качестве универсального принципа.

Летом 1905 г. Пуанкаре написал статью «О динамике электрона» [14]. Статья начинается констатацией: оптические и электродинамические явления не могут обнаружить абсолютное движение систем.

Пуанкаре делает отсюда следующий вывод: «Эта невозможность показать опытным путем абсолютное движение Земли представляет, по-видимому, общий закон природы; мы, естественно, приходим к тому, чтобы принять этот закон, который мы назовем постулатом относительности, и принять без оговорок. Все равно, будет ли позднее этот постулат, до сих пор согласующийся с опытом, подтвержден или опровергнут более точными измерениями, сейчас, во всяком случае, представляется интересным посмотреть, какие следствия могут быть из него выведены».

Собственно физические следствия, выведенные Пуанкаре из «постулата относительности», не выходят по существу за рамки классической физики. Так же как у Лоренца, здесь сохраняет смысл понятие «истинных» размеров тела (когда оно покоится в эфире) и «истинных» интервалов времени.

Статья Пуанкаре появилась на страницах итальянского журнала в начале 1906 г. К этому времени в «Annalen der Physik» в сентябрьском номере за 1905 г. уже была напечатана статья Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» [15]. В этой статье постоянство скорости света в различных движущихся одна относительно другой системах вытекает из самых общих постулатов о пространстве и времени. В теории Лоренца постоянство скорости света — феноменологический результат двух компенсирующих друг друга явлений: 1) замедления скорости света в продольном плече майкельсоновского прибора и 2) сокращения длины этого плеча. Оба процесса имеют абсолютный ха-

---

[13] «Принцип относительности», стр. 23.

[14] См. Rend. d. Circ. Pal., v. XXI, 1906, p. 129. Русск. пер. см. в кн.: «Принцип относительности», стр. 51—129.

[15] См., Ann. Phys., Bd 17, 1905, S. 891. Русск. пер. см. в кн.: А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I, М., 1965, стр. 7—35.

рактер в указанном выше смысле, т. е. скорость света меняется по сравнению с его скоростью в покоящейся относительно эфира системе и продольные размеры уменьшаются по сравнению с его размерами в той же системе.

В теории Эйнштейна постоянство скорости света имеет субстанциальный характер, и относительность характерна не для результатов эксперимента, а для независимого от эксперимента существа дела. Далее, постоянство скорости света вытекает у Эйнштейна из общих соображений о пространстве и времени, а не из электродинамики.

В 1955 г., незадолго до смерти, Эйнштейн писал Зелигу: «Если заглянуть в прошлое развития теории относительности, не будет сомнений в том, что в 1905 г. она созрела для своего появления. Лоренц уже знал, что уравнениям Максвелла соответствуют преобразования, названные потом его именем, а Пуанкаре углубил эту идею. Я был знаком с фундаментальной работой Лоренца, вышедшей в 1895 г., но позднейшей работы и связанного с ним исследования Пуанкаре не знал. В этом смысле моя работа была самостоятельной. Новое в ней состояло в следующем. Лоренцовы преобразования выводились здесь не из электродинамики, а из общих соображений...» [16].

Общие соображения антиципируют экспериментальные результаты — невозможность регистрации абсолютного движения. В письме Соловину Эйнштейн говорит: «Помимо прочего, теорию относительности характеризует эпистемологическая точка зрения. В физике нет понятия, применение которого было бы a priori необходимо или оправдано. Понятие завоевывает свое право на существование только своей ясной и однозначной связью с явлениями и, соответственно, с физическими опытами. В теории относительности понятия абсолютной одновременности, абсолютной скорости, абсолютного ускорения и т. д. отбрасываются, так как их однозначная связь невозможна. Каждому физическому понятию должно быть дано такое определение, в силу которого можно было бы в принципе решить, является ли оно в каждом конкретном случае соответствующим или не соответствующим действительности» [17].

---

[16] C. Seelig. Albert Einstein. Zürich, 1960, S. 116.
[17] A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine, p. 21.

Статья «К электродинамике движущихся сил» начинается констатацией экспериментально установленного факта: в системах, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, электродинамические процессы происходят единообразно, и это относится не только к величинам первого порядка, но и к величинам второго порядка. К этому экспериментально полученному принципу относительности Эйнштейн присоединяет тезис о постоянстве скорости света, тезис, противоречащий классическому правилу сложения скоростей. Присоединив тезис о постоянстве скорости света к принципу относительности, можно прийти к непротиворечивой электродинамике, но понятие эфира становится при этом излишним, так как исчезает абсолютное покоящееся пространство, физическим эквивалентом которого и был эфир. «Введение „светоносного эфира" окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится „абсолютно покоящееся пространство", наделенное особыми свойствами, и ни одной точке пустого пространства, в которой протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости» [18].

Здесь речь идет о физической бессодержательности скорости тела относительно эфира, или, что то же самое, скорости эфира относительно тел. В классической физике скорость света относительно тел делилась на две компоненты: скорость света в пространстве и скорость тела относительно этого пространства. Теперь мы уже не можем делить скорость света на эти компоненты, складывавшиеся по правилу сложения скоростей классической механики. Скорость света, распространяющегося в пустоте, всегда имеет одно и то же значение: когда мы измеряем эту скорость относительно различных тел, движущихся одно относительно другого прямолинейно и равномерно, мы получаем один и тот же результат.

Если пространство перестает быть средой, точки которой обладают скоростью относительно тела, то теряет смысл старое представление об одновременности. Исходя из неизменности скорости света в движущихся одна относительно другой инерциальных системах, Эйнштейн приходит к тезису об относительности одновременности. События, одновременные в одной системе отсчета, не бу-

[18] А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I, М., 1965, стр. 8.

дут одновременными в другой. Эйнштейн формулирует относительность одновременности в виде тезиса о невозможности синхронизировать часы, покоящиеся в одной системе отсчета, и часы, покоящиеся в другой системе, которая движется по отношению к первой. Синхронность часов означает, что события, которым соответствуют одинаковые положения стрелок, одновременны. То, что было одновременным для наблюдателя, находящегося в покоящейся системе, стало неодновременным для движущегося наблюдателя; часы, синхронные для покоящегося наблюдателя, перестают быть синхронными, когда он движется по отношению к системе, в которой покоятся часы.

Аналогично изменяются пространственные масштабы. Эйнштейн формулирует относительность масштабов в виде тезиса: длина стержня, измеренная в одной системе отсчета (в которой стержень покоится), и длина того же стержня, измеренная в системе отсчета, относительно которой стержень движется, отличаются одна от другой.

Следующий параграф статьи Эйнштейна посвящен преобразованиям пространственных координат и времени от покоящейся системы к системе, находящейся в равномерном прямолинейном движении относительно первой. Мы изложим этот параграф, несколько изменив буквенные обозначения. Перед нами две системы: $XYZ$ и $X'Y'Z'$,— причем оси $X$ и $X'$ совпадают, а $Y$ и $Y'$ и $Z$ и $Z'$ соответственно параллельны. В каждой системе применяются одинаковые часы и масштабы. Система со штрихованными осями движется со скоростью $v$ по оси $X$, т. е. ее начало координат движется в сторону возрастающих $x$ нештрихованной системы. Время покоящейся системы обозначим через $t$. Измерим в покоящейся системе $XYZ$ покоящимся масштабом координаты некоторой точки и обозначим их через $x$, $y$, $z$. В движущейся системе $X'Y'Z'$ при помощи движущегося масштаба мы получим для этой же точки координаты $x'$, $y'$, $z'$. Теперь покоящимися часами зафиксируем момент время $t$ для точки покоящейся системы $XYZ$, а другими часами, движущимися вместе с $X'Y'Z'$, иначе говоря, часами, покоящимися в штрихованной системе, определим время в этой системе $t'$. Если в точке $x$, $y$, $z$ в момент $t$ произошло какое-то событие, то оно определяется в движущейся системе величинами $x'$, $y'$, $z'$ и $t'$. Как перейти от нештрихованных величин к штрихованным? Какими уравнениями они связаны?

Из постоянства скорости света и свойств пространства и времени при переходе от $XYZ$ к $X'Y'Z'$ выводятся преобразования Лоренца:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Относительно преобразований Лоренца и одновременность, и пространственные и временны́е интервалы оказались неинвариантными, они изменяются при переходе от одной инерциальной системы к другой. Из постоянства скорости света вытекает существование другого инварианта. Таким инвариантом служит *интервал собственного времени* $\tau$. Он связан с временны́м интервалом и пространственным интервалом простым соотношением. В одной из инерциальных систем измерим расстояние между точками $A_1$ и $A_2$, где произошли два события. Координаты первой точки $x_1$, $y_1$, $z_1$, координаты второй — $x_2$, $y_2$, $z_2$. Пространственное расстояние между $A_1$ и $A_2$ обозначим через $r$. Квадрат его равен сумме квадратов разностей координат точек:

$$r^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2.$$

Время $t$, прошедшее между событиями в точках $A_1$ и $A_2$, не является инвариантом лоренцовых преобразований, так же как и пространственное расстояние между этими точками. Мы возведем $t$ в квадрат и вычтем из него квадрат времени, необходимого свету, чтобы пройти расстояние $r$ от $A_1$ до $A_2$. Разность

$$\tau^2 = t^2 - \frac{r^2}{c^2}$$

представляет собой инвариант лоренцовых преобразований. Если, например, события в $A_1$ и $A_2$ — это выход светового сигнала из $A_1$ и его попадание в $A_2$, то время $t$ совпадает с временем $r/c$ и в этом случае $r^2 = 0$, в какой

бы системе мы ни производили измерение. В случае других событий, отдаленных одно от другого во времени интервалом, превышающим интервал, который необходим свету, чтобы пройти расстояние $r$, $\tau^2$ будет больше нуля:

$$\tau^2 = t^2 - \frac{r^2}{c^2} > 0$$

и соответственно $\tau$ — вещественная величина. Если событие в $A_2$ поступило раньше, чем свет дошел из $A_1$ в $A_2$, т. е. $t^2 < r^2/c^2$, то

$$\tau^2 = t^2 - \frac{r^2}{c^2} < 0$$

и $\tau$ — мнимая величина.

Разумеется инвариантом является и разность между временем, разделяющим события, и временем прохождения света, взятая с обратным знаком по сравнению с $\tau^2$, т. е.

$$\frac{r^2}{c^2} - t^2.$$

Это выражение мы представим в несколько ином виде (умножив на $c^2$) и обозначим через $s^2$:

$$s^2 = r^2 - c^2t^2.$$

Отметим, что $\tau$ и $s$ имеют различный смысл: $\tau^2$ — это квадрат времени между событиями минус квадрат времени, необходимого свету, чтобы пройти расстояние $r$, а $s^2$ — это квадрат пространственного расстояния между событиями минус квадрат расстояния, пройденного светом за время, протекшее между событиями.

Эйнштейн назвал $\tau$ *интервалом собственного времени*, исходя из следующих соображений. Представим себе систему отсчета, движущуюся от $A_1$ к $A_2$ с такой скоростью, что события происходят в координатах этой системы в одной и той же пространственной точке. Пусть, например, первое событие произошло на перроне вокзала в городе $A_1$ в полночь, а второе событие — на перроне вокзала в городе $A_2$ в полдень. Для поезда, прибывшего из $A_1$ в $A_2$ в течение 12 часов, эти события произошли в одной и той же пространственной точке; в системе отсчета, в которой поезд неподвижен, точки $A_1$ и $A_2$ имеют совпадающие координаты. Соответственно в этой системе $r=0$ и

$r_2/c_2=0$. Поэтому, согласно уравнению $\tau^2=t^2-r^2/c^2$, в системе поезда время $t$, прошедшее между событиями, равно $\tau$. Иначе говоря, часы в поезде отсчитывают собственное время.

Эти интервалы, очевидно, будут мнимыми, если скорость поезда превысит скорость света. Но в этом случае вещественным будет другой инвариант: $s^2=r^2-t^2c^2$.

События, между которыми протекло время, большее, чем то, которое необходимо свету, чтобы дойти от $A_1$ до $A_2$, разделены *временноподобными* интервалами. В этом случае инвариант $\tau$ — вещественная величина, а $s$ — мнимая. Также события могут быть связаны одно с другим как причина и следствие. События, из которых второе наступило раньше, чем световой сигнал мог дойти из $A_1$ в $A_2$, разделены *пространственноподобными* интервалами. Эти события не могут быть связаны как причина и следствие. В этом случае $s$ — вещественная, а $\tau$ — мнимая величина.

Отметим еще, что в общем случае следует пользоваться бесконечно малыми интервалами времени $dt$ и пространства $dr$.

Тогда для интервала собственного времени $d\tau$ мы получаем

$$d\tau^2 = dt^2 - \frac{dr^2}{c^2},$$

а для второй формы инварианта лоренцовых преобразований

$$ds^2 = dr^2 - c^2dt^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2.$$

Теперь перейдем к выводу, который Эйнштейн сделал из невозможности движения системы со скоростью, превышающей скорость света. Он вывел из преобразований Лоренца правило сложения скоростей $v_1$ и $v_2$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}},$$

которое при малых скоростях превращается в классическое правило $v = v_1 + v_2$. Очевидно, результирующая скорость, согласно релятивистскому правилу сложения скоростей, при $v_1 < c$ и $v_2 < c$ не может быть больше и даже равна $c$. Сама скорость $c$, если к ней прибавить новую скорость, не изменится. Это предельная скорость.

В ньютоновой динамике скорость могла возрастать

неограниченно. При постоянстве массы (а это основа ньютоновой механики) каждый дополнительный толчок вызывал соответствующее ускорение. В динамике Эйнштейна последовательное приложение силы к движущемуся телу вызывает каждый раз некоторое ускорение, но скорость при этом не может перейти некоторые границы. Чем выше скорость, тем меньше становится ускорение под действием тех же сил. Говоря языком механики, когда скорость движущегося тела приближается к скорости света, масса стремится к бесконечности и соответственно ускорение становится исчезающе малым. Таким образом, масса тела теряет абсолютное значение; она имеет определенное значение только в данной системе координат и зависит от скорости тела в этой системе.

Таким образом, теория Эйнштейна релятивирует не только пространственную и временну́ю протяженность, но и массу, она показывает относительность значений массы, как и протяженности, в координатных системах. Если масса зависит от движения системы, то нужно в качестве исходного понятия рассматривать массу $m_0$ тела, покоящегося в данной системе, а затем перейти к определению массы $m$ этого тела в системе, относительно которой тело движется.

Величины $m_0$ и $m$ связаны выражением

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

В сентябре 1905 г. Эйнштейн написал небольшую статью — дополнение к первой работе о специальной теории относительности, где на двух страницах вывел знаменитое релятивистское соотношение между массой и энергией [19]:

$$E = mc^2.$$

Энергия тела, движущегося со скоростью $v$, равна

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

---

[19] См. A. Einstein. Ann. Phys., Bd 18, 1905, S. 639. Русск. пер.: А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I, М., 1965, стр. 36—38.

Отсюда следует, что при $v = 0$ энергия равна

$$E_0 = m_0 c^2.$$

Только что указанное соотношение между энергией и массой является одним из самых важных следствий теории относительности, проверенным с огромной точностью в современной физике атомного ядра и элементарных частиц.

## 4. Четырехмерный мир

После классических работ Эйнштейна для дальнейшего развития специальной теории относительности особенно большое значение приобрели труды Германа Минковского: «Принцип относительности» (1907 г.), «Основные уравнения электромагнитных явлений в движущихся телах» (1908 г.) и «Пространство и время» (1908 г.) [20].

Эти труды позволили изложить теорию относительности Эйнштейна в форме геометрических соотношений, аналогичных соотношениям геометрии Эвклида. Но в отличие от обычной, трехмерной эвклидовой геометрии здесь речь идет о четырехмерной геометрии.

Пространство измеряется тремя координатами, время можно рассматривать в качестве четвертой координаты. В этом смысле четырехмерность мира — истина старая, давно ставшая привычной, само собой разумеющейся. Аналитическая геометрия позволяет представить геометрические объекты в виде входящих в уравнения числовых величин; но она же, с другой стороны, позволяет геометрически представить любые числовые величины. Такой величиной является и время. Откладывая на одной оси пройденный путь, а на другой — время, мы получаем графическое изображение движения в виде кривой, каждая точка которой характеризуется значениями времени и пройденного пути. При движении в трехмерном пространстве координата времени оказывается четвертой по счету, и механика может быть изложена как четырехмерная геометрия. Смысл трактовки времени в качестве четвертой координаты заключается в том, что реальные события обладают четвертым измерением — длительностью по вре-

[20] См. Доклад, сделанный на съезде естествоиспытателей и врачей в Кельне 21 сентября 1908 г. Phys. Zs., Bd 10, 1909, S. 105, Русск. пер. в сб. «Принцип относительности», стр. 181—203.

мени. В «Энциклопедии» в статье «Измерение», написанной д'Аламбером, говорится: «Я сказал выше, что невозможно представить себе более трех измерений. Между тем, один мой знакомый, человек весьма остроумный, полагает, что длительность можно рассматривать как четвертое измерение и что умножение объема на время даст произведение, имеющее четыре измерения. Можно оспаривать эту идею, но я нахожу, что она имеет некоторые достоинства, хотя бы новизны» [21].

Такие мысли высказывались неоднократно. Минковский придал представлению о времени как о четвертом измерении иной, более глубокий смысл.

Минковский сравнивает между собой два способа изображения движения. Если точка движется по прямой, ее движение можно изобразить отрезком, который она проходит, но это еще не даст полной картины движения. Нужно отметить скорость и указать время, в течение которого точка достигает каждого пункта данного отрезка. Это можно сделать, обозначив на каждом пункте параметр — время, отсчитываемое от начала движения. Но можно также отметить время перпендикулярами, восставленными из каждого пункта отрезка, причем длина перпендикуляра равна времени, прошедшему от начала движения точки до момента, когда она достигла пункта, откуда восставлен перпендикуляр. Соединив вершины этих перпендикуляров, мы получаем геометрическое изображение всего процесса движения и в пространстве и во времени — пространственно-временну́ю кривую, изображающую прямолинейное движение точки. Если точка движется не по прямой, а на плоскости, то первый способ даст нам плоскую кривую с распределенными по ней параметрами времени, а второй способ — трехмерную кривую. Очевидно, если точка движется в пространстве трех измерений, то ее движение можно представить трехмерной пространственной кривой с параметром времени в каждом пункте либо четырехмерной пространственно-временно́й кривой, которая, разумеется, не может быть представлена наглядной пространственной моделью.

---

[21] Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers. Par une société des gens de lettres. Mis en ordre et publié par m. Diderot et quant à la partie mathématique par m. D'Alambert, t. IV. Paris, chez Brisson, 1754, p. 1010.

Когда мы проектируем четырехмерную кривую на трехмерное пространство (вообще при проектировании $n$-мерного объекта на $(n-1)$-мерное пространство), вид проекции и распределение параметров на ней зависят от выбора системы отсчета в $(n-1)$-мерном пространстве. Ведь и при проектировании трехмерной пространственной кривой на двумерную поверхность или двумерной кривой на прямую проекция зависит от избранной поверхности или прямой. Если же мы не пользуемся проекциями, вид кривой не зависит ни от каких внешних поверхностей или линий. Аналогичным образом четырехмерная пространственно-временна́я кривая дает инвариантное, независимое от систем отсчета представление движения, в то время как пространственная трехмерная проекция этой четырехмерной кривой зависит от пространственных систем отсчета.

Идея Минковского — переход от трехмерного, пространственного (с параметром, показывающим время) представления движения к четырехмерному пространственно-временно́му — совпадает с идеей Эйнштейна, заключающейся в инвариантном представлении физических закономерностей. В той форме, какую придал теории относительности Минковский, время теряет свое изолированное от пространства представление, которое было одним из основных принципов дорелятивистской физики. Это новое представление о соотношении между пространством и временем кажется Минковскому настолько фундаментальным признаком новой теории, что «постулат относительности» представляется ему недостаточно ярким названием для комплекса новых идей. «Так как смысл постулата сводится к тому, что в явлениях нам дается только четырехмерный в пространстве и времени мир, но что проекции этого мира на пространство и на время могут быть взяты с некоторым произволом, мне хотелось бы этому утверждению скорее дать название: постулат абсолютного мира (или, коротко, „мировой постулат“)» [22].

Реальным, происходящим в пространстве и времени событиям соответствуют точки, характеризуемые определенными значениями четырех координат. Пространственную точку, рассматриваемую в определенный момент времени, Минковский называет *мировой точкой*, а совокуп-

[22] «Принцип относительности», стр. 192.

ность всех мыслимых мировых точек, т. е. всех мыслимых значений четырех координат, он называет *миром*. События параметризуются мировыми точками, точками четырехмерного континуума. В качестве события Минковский рассматривает пребывание материальной точки в определенном месте в определенное время. «Чтобы не говорить о материи или электричестве,— пишет Минковский,— я буду пользоваться словом субстанция для обозначения этого объекта» [23]. Пусть некоторая субстанциальная точка находится в мировой точке, т. е. имеет определенные значения пространственных и временной координат. Предположим, что мы ее сможет узнать во всякое другое время. Дадим некоторое приращение значению времени. Этому будут соответствовать изменения пространственных координат. Тогда мы получим изображение жизненного пути субстанциальной точки — некоторую кривую в «мире», *мировую линию*. «Весь мир,— пишет Минковский,— представляется разложенным на такие мировые линии, и мне хотелось бы сразу отметить, что, по моему мнению, физические законы могли бы найти свое наисовершеннейшее выражение как взаимоотношения между этими мировыми линиями».

«Наисовершеннейшее выражение» физических законов означает в данном случае инвариантное выражение. При переходе от одной инерциальной системы к другой изменяется не скорость света, а течение времени. При этом переходе инвариантным оказывается не *время*, а *собственное время*. Это значит, что формулы преобразования классической механики — преобразования Галилея — неточны и их следует заменить формулами, в которых время меняется при переходе к другим инерциальным системам, подобно пространству.

Минковский исходил из этого сходства и создал при помощи некоторых чисто математических приемов чрезвычайно мощный аппарат физической теории, без которого специальная теория относительности не могла бы так быстро стать ступенью к более широкой и общей теории.

Из сказанного видно, что идея Минковского не совпадает со старым, нисколько не противоречащим классической физике представлением о времени как о четвертой координате.

---

[23] «Принцип относительности», стр. 183.

В автобиографии 1949 г. Эйнштейн говорил: «Весьма распространенной ошибкой является мнение, будто частная теория относительности как бы открыла, или же вновь ввела, четырехмерность физического многообразия (континуума). Конечно, это не так. Четырехмерное многообразие пространства и времени лежит в основе также и классической механики. Только в четырехмерном континууме классической физики «сечения» соответствующие постоянному значению времени, обладают абсолютной (т. е. не зависящей от выбора системы отсчета) реальностью. Тем са ым четырехмерный континуум естественно распадается на трехмерный и на одномерный (время), так что четырехмерное рассмотрение не навязывается как необходимое. Частная же теория относительности, наоборот, создает формальную зависимость между тем, как должны входить в законы природы пространственные координаты, с одной стороны, и временна́я координата, с другой» [24].

Теория относительности говорит не о том, что время может быть изображено четвертой координатой, а о том, что три пространственные координаты и время зависят друг от друга определенным образом и, взятые порознь, не находят непосредственного физического эквивалента.

«То обстоятельство,— пишет Эйнштейн,— что нет объективного расщепления четырехмерного континуума на трехмерно-пространственный и одномерно-временно́й континуумы, имеет своим следствием, что законы природы получают свою логически удовлетворительнейшую форму лишь в том случае, когда их выражают как законы четырехмерного пространственно-временно́го континуума. В этом заключается сущность того значительного методического успеха, которым теория относительности обязана Минковскому...» [25]

Минковский, а до него Пуанкаре исходили из основного метрического соотношения трехмерной эвклидовой геометрии для квадрата расстояния между двумя бесконечно близкими точками:

$$dr^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

---

[24] «Усп. физ. наук», т. 59, вып. 1, 1956, стр. 91.

[25] А. Эйнштейн. Математические основы теории относительности. Пг., 1923, стр. 35.

Они видели сходство между этой инвариантной формой и инвариантом преобразований Лоренца:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2.$$

Пуанкаре заменил переменную $t$, т. е. время, переменной $u = ict$, иными словами, помножил $t$ на скорость света $c$ и на $\sqrt{-1}$ (Минковский пользовался вещественной формой $u = ct$ и ставил множитель $i$ перед $u$). Тогда инвариант преобразования Лоренца принимает вид

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + du^2.$$

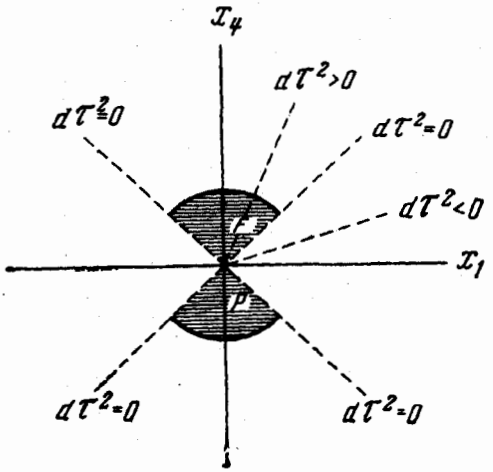
Рассматривая $u = ict$ как четвертое измерение, мы можем назвать $ds$ четырехмерным «расстоянием» между двумя мировыми точками. В эвклидовой геометрии расстояние определяется квадратичной формой: квадрат расстояния равен сумме квадратов координатных разностей. Мы могли бы назвать пространственно-временно́й мир Минковского четырехмерным эвклидовым миром, если бы не то обстоятельство, что вещественная координата $t$ заменена мнимой $u$. Учитывая это обстоятельство, пространственно-временно́е многообразие с метрикой, аналогичной трехмерной эвклидовой, называли *псевдоэвклидовым многообразием.*

Преобразования Лоренца приобретают геометрическую форму поворотов в четырехмерном пространстве — времени. В классической физике была известна изотропность трехмерного пространства — отсутствие избранных направлений в пространстве и инвариантность расстояний и вообще пространственных структур по отношению к трехмерным пространственным вращениям. Теперь изотропность приобретает менее наглядный, но более общий вид. Четырехмерный пространственно-временно́й мир оказывается изотропным. Физические законы не меняются, уравнения сохраняют свой вид, пространственно-временно́й интервал инвариантен при четырехмерных вращениях, включающих пространственные вращения в плоскостях $X_1X_2$, $X_1X_3$, $X_2X_3$ и преобразования Лоренца в более узком смысле — вращения координатной системы в плоскостях $X_4X_1$, $X_4X_2$, $X_4X_3$, означающие переход от одной инерциальной системы к другой, движущейся относительно первой соответственно вдоль осей $X_1$, $X_2$, $X_3$.

Можно придать геометрический вид разделению интервалов $d\tau$ на пространственноподобные и временноподоб-

ные. Это разделение приобретает особенно отчетливый вид, если ограничиться одной плоскостью $X_1X_4$.

Начало координат — это «здесь» и «сейчас». Вертикальная (параллельная оси $X_4$) прямая на этом чертеже изображала бы мировую линию пространственно неподвижной точки. Горизонтальная прямая — мировая линия




точки, движущейся с бесконечной скоростью по оси $X_1$, или проекция на плоскость $X_4X_1$ мировой линии точки, движущейся с бесконечной скоростью по направлению оси $X_1$. Теория относительности отвергает возможность такой скорости. Пределом скорости движущейся точки является скорость света. Движение светового сигнала изобразится прямой $d\tau^2=0$. Это мировая линия точки, движущейся со скоростью света, или, что то же самое, точки пересечения сферической световой волны, исходящей из начала координат, с осью $X_1$. Угол, образуемый прямой $d\tau^2 = 0$ с осью $X_4$, соответствует скорости света. Он является наибольшим углом для прямой, изображающей движение материальной точки, проходящей $x = 0$ в $t = 0$, или распространение взаимодействия из одного пункта в другой, иначе говоря, изображающей *причинную связь* между событием в начале четырехмерных координат и другим событием. В секторе, ограниченном прямыми $d\tau^2=0$ и прилегающем к оси $X_4$, находятся все прямые $d\tau > 0$, т. е. все точки плоскости $X_1X_4$, связанные с началом координат временноподобными интервалами. Этому

бесконечному сектору соответствует такой же сектор ниже оси $X_1$, так как мировые линии связывают событие в начале координат с событиями, происшедшими на оси $X_1$ по другую сторону от «здесь» и в прошлом, т. е. раньше, чем «сейчас».

Если дополнить схему осями $X_2$ и $X_3$, т. е. иметь в виду все оси пространства — времени (что уже нельзя представить не только чертежом, но и трехмерной моделью), то совокупность всех прямых $d\tau^2 = 0$ вырежет из четырехмерного мира наглядно непредставимый четырехмерный «конус» — *световой конус*, ограниченный также непредставимой трехмерной «поверхностью».

Мысль о неразрывности пространства и времени лежит в основе релятивистской механики и электродинамики. Механика специальной теории относительности объединяет три составляющие импульса и энергию в один четырехмерный вектор. В электродинамике аналогичным образом объединяются в один вектор компоненты напряженности электрического поля **E** и магнитного поля **H**. Становится относительным различие между электрическими и магнитными полями: электрический заряд в одной системе рассматривается как неподвижный и, следовательно, образующий лишь электрическое поле, а в другой он представляется движущимся и образующим также и магнитное поле.

В четырехмерном представлении меняется и отношение между импульсом и энергией. Импульс — это вектор с тремя составляющими по трем пространственным осям. Импульс тела характеризует его поведение в последовательных точках его пространственной траектории. Сохранение импульса означает однородность пространства: в каждой новой точке своего пути тело ведет себя неизменно, если оно не получает дополнительного толчка. Энергия характеризует поведение тела или системы тел в последовательные мгновения, сохранение энергии означает неизменность поведения тел во времени при отсутствии внешних сил, иными словами — однородность времени, эквивалентность следующих одно за другим мгновений. Но теперь, в четырехмерном представлении, энергию можно считать четвертой составляющей (проекцией на временну́ю ось) единого *четырехмерного вектора энергии-импульса*. Законы сохранения сливаются в один закон сохранения четырех компонент этого вектора. Соответственно можно

говорить об *однородности пространства — времени:* одна мировая точка не отличается от другой по поведению тела или системы тел, если на это тело или на эту систему не действуют внешние силы.

В зависимости от внешних сил при переходе от одной мировой точки (от одного «здесь — теперь») к другой (к другому «здесь — теперь») меняется четырехмерный вектор энергии-импульса, меняются по-разному его *четыре* составляющие, в зависимости от того, куда, в какую из *четырех* сторон пространства — времени перешло тело. Соответственно изменение вектора энергии-импульса описывается, вообще говоря, $4 \cdot 4 = 16$ (независимых 10) коэффициентами, образующими *тензор энергии-импульса.*

## 5. Принцип эквивалентности

Важным этапом создания общей теории относительности был сформулированный Эйнштейном в 1911 г. принцип эквивалентности, согласно которому в бесконечно малых областях действие тяготения можно заменить ускорением. Тогда же Эйнштейн указал на искривление лучей света в поле тяготения.

Задолго до строгой математической формулировки принципа эквивалентности в мыслях Эйнштейна витала картина движущегося ящика или лифта, в котором нельзя отличить ускорение от действия тяжести.

Представим себе лифт, движущийся вверх с ускорением, равным ускорению силы тяжести, в то время как гравитационное поле исчезло. Какие явления будут происходить в лифте? Уронив какой-нибудь предмет, мы увидим, что он падает на пол. Все будет происходить так, как будто лифт висит, подвешенный на тросе, удерживающем его в поле тяготения. Как же доказать, что в данном случае причиной явлений, происходящих в лифте, служит не тяжесть, а ускорение движения лифта? В случае тяготения поведение предметов определялось бы их тяжелыми массами, в случае ускоренного движения эту роль играют инертные массы. Если ускорение и тяготение эквивалентны и вызывают одни и те же физические явления, то инертная масса должна быть равна тяжелой, и, таким образом, старая загадка ньютоновой механики получает, наконец, объяснение.

По словам Эйнштейна, опытный факт одинакового

ускорения всех падающих тел, который ранее не находил еще места в основах нашей физической картины мира, становится очевидным с точки зрения принципа эквивалентности [26].

Принцип эквивалентности позволяет в некоторой степени (ниже будет сказано, в какой именно степени) приравнять друг другу: 1) движение тела в гравитационном поле в неподвижной или инерциальной системе и 2) свободное движение тела, не испытывающего тяготения, в неинерциальной системе, т. е. в системе, движущейся с ускорением. В неподвижной системе отсчета свободное движение всех тел — равномерное и прямолинейное. Таким же оно остается в инерциальной системе. В неинерциальной системе, т. е. в системе, движущейся с ускорением, все свободно движущиеся тела будут двигаться с одинаковым ускорением, их скорости будут в каждый момент равными, если они были равными в начальный момент. В случае равномерно ускоренной системы отсчета все находящиеся в этой системе свободно движущиеся тела будут обладать относительно нее одним и тем же ускорением. Таким же ускорением относительно инерциальной системы будут обладать тела, находящиеся в однородном и постоянном гравитационном поле. Мы рассматриваем поле тяготения Земли в лифте в качестве примера такого однородного и постоянного поля. Движение системы с неравномерным ускорением эквивалентно движению *в переменном* гравитационном поле.

Эйнштейн говорит, что принцип эквивалентности очевиден для чисто механических явлений, а его более глубокий смысл состоит в равноценности тяготения и ускорения относительно *всех* физических явлений. В сущности, основные наблюдения, на которых покоится механический принцип эквивалентности, были сделаны Галилеем. Из одинаковой скорости падения тел следует равенство тяжелой и инертной массы и объясняющий ее принцип эквивалентности, но общая теория относительности отнюдь не сводится к этому механическому принципу. Здесь наблюдается примерно то же, что мы встретили в специальной теории относительности, где обобщение старого принципа относительности и его распространение на новый ряд яв-

[26] См. А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I, М., 1965, стр. 166.

лений (электродинамику) потребовали коренного пересмотра основных понятий физики и механики.

Представим себе покоящуюся систему, причем находящиеся в ней тела испытывают тяготение, и другую, движущуюся с ускорением, но не испытывающую действия тяготения. Описания явлений в этих системах эквивалентны, так как физический эффект ускорения и тяготения один и тот же. Представим себе теперь, что световой луч входит в каждую систему, пересекая ее перпендикулярно направлению движения. На первый взгляд свет будет вести себя по-разному при двух ситуациях, казавшихся нам эквивалентными. Если система движется, то свет выйдет из нее в точке, несколько смещенной. Если же система покоится и испытывает не ускорение, а тяготение, то луч, по-видимому, выйдет из системы в точке, которая лежит как раз против той, где он вошел. Но последнее будет иметь место лишь в том случае, если свет не испытывает влияния тяготения и не смещается в гравитационном поле. На самом же деле свет обладает инертной массой, которая эквивалентна тяжелой массе. Поэтому луч света сместится под влиянием тяготения так же, как он сместился бы благодаря ускорению. Этот вывод вызвал оживленную дискуссию. Абрагам [27] выступил в 1912 г. со статьей, в которой счел ограничение принципа постоянства скорости света отказом от теории относительности. Отвечая Абрагаму, Эйнштейн дал отчетливое изложение вопроса о границах специального принципа относительности [28].

Эйнштейн прежде всего указывает, что принцип относительности сам по себе еще недостаточен для теории преобразования пространства и времени. Специальная теория относительности основана как на принципе относительности, так и на постулате постоянства скорости света. Она сохраняется в тех пределах, в которых остаются справедливыми оба эти принципа. Первый из них, по мнению Эйнштейна, имеет универсальный характер. Напротив, постоянство скорости света ограничено областями с постоянным потенциалом тяготения. Поэтому ограничение специальной теории относительности областями с постоянным потенциалом тяготения не обозначает какого-нибудь ограничения принципа относительности. «Здесь, по моему

[27] См. Phys. Zs., Bd. 13, 1912, S. 311.

[28] См. А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I, М., 1965, стр. 217—222.

мнению,— пишет Эйнштейн,— лежит граница применения не для принципа относительности, но для принципа постоянства скорости света и вместе с этим для нашей современной теории относительности» [29]. Говоря о том, что тяготение не укладывается в схему специальной теории относительности, Эйнштейн продолжает: «Это положение вещей, по-моему, вовсе не означает ошибочности основанного на принципе относительности метода, точно так же как открытие и правильное понимание броуновского движения не приводит к заключению, что термодинамика и гидродинамика являются ошибочными. Современная теория относительности, по моему мнению, всегда сохранит свое значение как простейшая теория явлений в пространстве — времени для весьма важного предельного случая постоянного потенциала тяготения. Задачей ближайшего будущего является создание такой теоретической релятивистской схемы, в которой эквивалентность между инертной и тяжелой массами сможет найти свое выражение. В своей работе о статическом поле тяжести я пытался сделать первые весьма скромные шаги к достижению этой цели. При этом я исходил из представления, что эквивалентность инертной и тяжелой масс может быть сведена к тождественности по существу этих двух элементарных качеств материи или энергии тел, что статическое поле тяготения рассматривается как физически тождественное с ускорением системы отсчета. Я должен сознаться, что мне удалось разработать это представление без противоречия только для бесконечно малых областей и что я не могу дать этому обстоятельству никакого удовлетворительного объяснения. Но я не вижу в этом оснований отказаться от принципа эквивалентности и для бесконечно малых областей, никто не сможет отрицать, что этот принцип представляет собой естественную экстраполяцию одного из наиболее общих экспериментальных законов физики. С другой стороны, принцип эквивалентности открывает перед нами возможность интереснейшего требования, что уравнения некоторой новой, охватывающей также гравитацию теории относительности должны оказаться инвариантными и по отношению к преобразованиям с ускорением (и вращением). Конечно, путь к этой цели представляется весьма трудным».

---

[29] А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I, М., 1965, стр. 219.

В 1913—1914 гг. Эйнштейн овладевает необходимым для создания общей теории относительности новым математическим аппаратом — тензорным анализом — и публикует вместе с Марселем Гроссманом две работы.

В этих работах общая теория относительности уже начинает приобретать современный вид. Удачно выбранный математический аппарат позволяет все конкретнее и глубже проводить идею ковариантности физических уравнений в отношении все более общих преобразований.

В 1915—1916 гг. Эйнштейн публикует ряд важных работ, разъясняющих отдельные проблемы и основы общей теории относительности. Наконец, в 1916 г. выходят в свет «Основы общей теории относительности» [30].

В 1911 г. Эйнштейн говорил, что принцип эквивалентности справедлив только для однородного гравитационного поля. «Конечно, нельзя *любое* поле тяготения заменить состоянием движения системы, без гравитационного поля, точно так же как нельзя преобразовать все точки произвольно движущейся среды к покою посредством релятивистского преобразования» [31].

Позднее, в 1916 г., отвечая на критическую статью Коттлера, Эйнштейн пишет [32]: «Пусть система $K$, в которой существует однородное поле тяжести, будет исходной. Тогда можно ввести систему отсчета $K$, движущуюся с ускорением относительно $K$, в которой (изолированная) масса будет двигаться прямолинейно и равномерно (в рассматриваемой области). Однако *нельзя* распространять эти рассуждения на любые гравитационные поля. Нельзя утверждать, что, если в системе $K'$ существует *произвольное* гравитационное поле, то всегда найдется такая система $K$, по отношению к которой изолированная масса движется прямолинейно и равномерно, т. е. к которой нет никакого поля тяжести. Абсурдность такого утверждения очевидна. Например, если поле тяжести в системе $K$ создается покоящейся материальной точкой, то это поле для всей области вокруг материальной точки невозможно исключить никакими преобразованиями системы координат» [33].

---

[30] А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I, М., 1965, стр. 452—504.

[31] Там же, стр. 166.

[32] Там же, стр. 505—507.

[33] Там же, стр. 506.

Таким образом, нельзя в больших областях, где гравитационные поля неоднородны, свести их к ускорениям систем отсчета. Подойдем теперь к принципу эквивалентности с другой стороны. Возьмем классический пример — вращающееся ведро, фигурирующее в ньютоновых «Началах натуральной философии». Ньютон считал центробежную силу, поднимающую уровень воды у стенок вращающегося ведра, доказательством его абсолютного вращения. Принцип эквивалентности позволяет рассматривать вращающееся ведро как систему, не испытывающую вращения, объяснить центробежную силу тяготением, действующим в этой инерциальной системе и поднимающим к краям воду в ведре, тяготением, эквивалентным неинерциальной вращающейся системе. Но такие гравитационные поля, эквивалентные неинерциальным системам, отличаются от «истинных» гравитационных полей в инерциальных системах в следующем весьма существенном отношении.

Представим себе «истинное» гравитационное поле, созданное материальным телом и бесконечно распространяющееся во все стороны. Оно уменьшается по мере удаления от центра и стремится к нулю на бесконечном расстоянии.

Теперь представим себе ньютоново вращающееся ведро. Центробежные силы, поднимающие воду к краям ведра, растут по мере удаления от центра, и соответственно растет эквивалентное вращению системы поле тяготения. На бесконечном расстоянии оно стремится к бесконечному значению. Подобное же различие между «истинными» гравитационными полями и гравитационными полями, эквивалентными неинерциальным системам, можно обнаружить в случае прямолинейного равноускоренного движения системы. Эквивалентное такому ускорению гравитационное поле не растет, оно остается одинаковым при удалении на бесконечное расстояние.

Невозможность распространения принципа эквивалентности на области с неоднородными гравитационными полями — одна из основных посылок Эйнштейна. Эйнштейн в течение нескольких лет разрабатывал теорию однородного гравитационного поля, где принцип эквивалентности полностью осуществляется и где тяготение может быть полностью заменено ускорением. Но переход к общей теории относительности как теории произвольных гравитационных полей основан на ограничении прин-

ципа эквивалентности малыми, вообще говоря, бесконечно малыми масштабами. Из такого ограничения вытекали дальнейшие идеи Эйнштейна, приведшие к обобщению принципа относительности, т. е. к построению теории инвариантов групп преобразований более общих, чем группа Лоренца.

Чтобы изложить эти идеи, нужно предварительно остановиться на некоторых геометрических понятиях, уже появлявшихся при изложении специальной теории относительности. Теперь требуется более общая трактовка понятий координатных преобразований и их инвариантов.

## 6. Преобразования и инварианты

Форма, в которой была изложена специальная теория относительности в первой статье Эйнштейна в 1905 г., и еще более форма, которую придал теории относительности Минковский, позволяли видеть связь понятия относительности с понятием инварианта преобразований. Различие между классическим принципом относительности Галилея — Ньютона (независимость механических процессов от инерционных движений), специальным принципом относительности Эйнштейна и общим принципом относительности можно представить как различие в преобразованиях, оставляющих инвариантными некоторые физические величины и соотношения.

В классической физике инвариантными, независимыми от выбора системы координат, считали пространственные и временны́е интервалы. Изучая движения твердых тел и жестких систем, пришли к убеждению, что расстояние между двумя точками, например двумя концами твердого стержня, не меняется при движении стержня, не зависит от положения стержня, от его координат в какой-то системе, от выбора координатной системы. Если *положение* каждой точки относительно, если *координаты* точки зависят от того, к какой системе они отнесены, то расстояния между точками, входящими в систему, представляют внутреннее свойство системы, не зависящее от положения точек. Движение системы не меняет взаимных расстояний между материальными точками системы, не меняет ее структуры; система при таких движениях остается жесткой. Поэтому о движении системы можно судить по ее расстояниям от тел отсчета, относительно тел

отсчета. Эти свойства материальных тел отображаются геометрическими законами. Конечно, не всякая геометрия описывает свойства твердых тел и жестких систем. Применяемую в каждом случае геометрию можно охарактеризовать ее инвариантами. В эвклидовой геометрии на плоскости инвариантом при преобразовании координат служит квадрат расстояния $r$ между двумя точками, равный сумме квадратов разностей координат этих точек. Если речь идет не о прямых отрезках, а о кривых на плоскости, то вместо $r$ мы может взять бесконечно малое расстояние $dr$. Так пришли к дифференциальной квадратичной форме

$$dr^2 = dx^2 + dy^2.$$

В геометрии Эвклида в пространстве инвариантом является квадрат бесконечно малого расстояния между двумя точками трехмерного пространства:

$$dr^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Совокупность инвариантов — расстояний между материальными точками системы — образует ее пространственную структуру. Написанные только что выражения для $dr^2$ представляют собой формулы перехода от величин, меняющихся при смене системы отсчета (имеющих поэтому смысл только при указании системы отсчета) и выражающих пространственную *ориентировку* системы, состоящей из точек $(x, y, z)$ и $(x + dz, y + dy, z + dz)$, к величине, независимой от системы отсчета (инвариантной при смене системы отсчета, выражающей *структуру системы*). Речь идет о *трехмерном пространстве*. Но не лишним будет хотя бы намекнуть здесь на более общую трактовку понятия координат и перехода от координат к инвариантным величинам [34].

Рассмотрим взаимно однозначное соответствие между физическим многообразием $F$ и множеством чисел $M$. Представим себе множество физических объектов (или, что в данном случае безразлично, множество состояний одного и того же объекта в различные моменты времени) и будем сравнивать свойства этих объектов, относящиеся к одному и тому же классу — плотности, температуре,

[34] См. А. А. Фридман. Мир как пространство и время. Изд. 2-е, М., 1965, стр. 11—32. Изд. 5. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2009.

цвету, пространственному положению и т. д. Свойства, относящиеся к одному и тому же классу, образуют физическое многообразие: плотность, температуру, цвет и т. д. В зависимости от характера физического многообразия ему сопоставляется множество целых чисел, алгебраических чисел, всех чисел. Сопоставление числового множества физическому многообразию назовем *параметризацией* многообразия. Иногда изучаемые свойства могут быть представлены не множеством чисел, а множеством систем, состоящих из $n$ чисел каждая. Тогда говорят об $n$-мерном многообразии. Такие многообразия, как количество молекул газа в некотором объеме, параметризуются множеством целых чисел. Такие многообразия, как объем, вес, температура, могут быть представлены более мощными множествами, вплоть до множества всех чисел. Положение на поверхности — это другое свойство, многообразие таких положений параметризуется множеством двоек чисел, например, широт и долгот. Положению в пространстве соответствуют три числа: кроме только что указанных — высота (например над уровнем моря). Событие — прообраз четырех чисел (три упомянутых и время, прошедшее с начала суток, месяца, года, начала летоисчисления).

Иногда сопоставление физического многообразия с множеством чисел позволяет только отличить один элемент физического многообразия от другого элемента. Но если мы изучаем свойства, допускающие сравнительную оценку, если к ним применимы понятия интенсивности «больше» и «меньше», то большей интенсивности соответствует большее число, а меньшей — меньшее. Здесь мы сталкиваемся с относительными понятиями: «больше» и «меньше» имеют смысл, если только указать, больше или меньше чего данная интенсивность. То же самое — оценки: «справа — слева», «сверху — снизу», «впереди — сзади», «раньше — позже». Каждая из них характеризует место и время событий относительно другого. Можно перенести эти соотношения в мир числовых множеств и параметризовать многообразия интенсивностей, сопоставляя их с множествами чисел или систем чисел.

Дальнейший шаг позволяет параметризовать физические многообразия с помощью множеств равноотстоящих чисел. Если каждые три элемента многообразия — это три равноотстоящие интенсивности $f_1$, $f_2$ и $f_3$, т. е. $f_3$

настолько больше $f_2$, насколько $f_2$ больше $f_1$, то мы можем сопоставить с рядом равноотстоящих интенсивностей $f_1$, $f_2$, $f_3$, ..., $f_n$ ряд чисел $m_1$, $m_2$, $m_3$, ..., $m_n$, которые отличаются тем свойством, что $m_3 - m_2 = m_2 - m_1$, $m_4 - m_3 = m_3 - m_2$, ...; вообще $m_n - m_{n-1} = m_{n-1} - m_{n-2}$.

Разумеется, такое свойство, как «пространственное положение» тела, нельзя ни измерить, ни оценить выражениями «больше» или «меньше», если не разделить каждое такое свойство на три измеримые интенсивности — расстояния от трех внешних тел. Каждая материальная точка имеет пространственное положение, заданное тремя числами, а многообразие пространственных положений параметризуется многообразием систем из трех чисел каждая. Поэтому мы будем считать, что при параметризации физического многообразия $F \to M$ каждому прообразу, т. е. элементу $f$ физического многообразия $F$, соответствует элемент $m$ числового множества $M$, причем $m$ может быть и одним числом и системой, состоящей из двух, трех, вообще, многих чисел.

Разумеется, *измерение* интенсивностей оставляет в силе относительность понятий «больше — меньше» и «слева — справа». Вводя положительные и отрицательные отсчеты, мы сводим их к вдвое меньшему числу оценок. Далее можно соединить эти относительные количественные оценки (например, соединить оценки «настолько-то направо», «настолько-то вверх», «настолько-то вперед») и получить также относительное понятие *места* в какой-то системе координат.

Параметризация позволяет количественно выразить и другие понятия, не требующие тела отсчета, относящиеся к двум и более материальным точкам и выражающие структуру такого многообразия. Структура может быть представлена в виде ряда измеримых интенсивностей — собственных свойств геометрических фигур — и соответственно после параметризации — в виде чисел. Пространственные расстояния («отрезок прямой между точками содержит 10 *см*»), временны́е интервалы («между этими событиями прошло 10 лет»), объемы и площади представляют собой измеримые интенсивности, не требующие указаний на опорные тела отсчета. Двум точкам принадлежит внутреннее свойство — расстояние, многим точкам — объем, форма, плотность, средняя скорость взаимных смещений и т. д. Параметризация этих свойств

может дать математические величины, не зависящие от выбора параметризации положений. Правда, и здесь требуются указания на величину масштаба, но это обстоятельство мы пока не будем учитывать.

Теперь нам понадобится другое понятие, с которым мы, впрочем, уже встречались,— понятие *преобразования.*

Под преобразованием будем понимать переход от параметризации $F \to M$ к параметризации $F \to M'$. Сначала остановимся на частных примерах преобразования, потом на понятиях, позволяющих классифицировать бесчисленное множество различных преобразований. Представим себе параметризацию измеримого и фактически измеренного физического многообразия $F \to M$ и вторую параметризацию $E \to M'$. Многообразие $F$ не меняется от выбора параметризации, поэтому каждому $f$ соответствует одно и только одно $m$ и одно и только одно $m'$. Следовательно, однозначное соответствие существует и между $M$ и $M'$. В таких случаях говорят, что $m'$ является функцией $m$. Если при переходе $m—m'$ мы меняем только начальное значение измеряемой интенсивности (т. е. интенсивность, соответствующую нулю) и масштаб (т. е. разность интенсивностей, соответствующую единице в числовом ряду), то мы можем выразить $m'$ через $m$ линейной функцией

$$m' = f(m) = h + \mu m,$$

где постоянная $h$ зависит от выбора нового начального значения, а постоянная $\mu$ — от выбора масштаба. Если начальное значение при преобразовании не меняется, то $m'$ выражается через $m$ линейной однородной функцией

$$m' = f(m) = \mu m.$$

Если меняется только начальное значение, то

$$m' = f(m) = h + m.$$

Ниже будет сказано, как называется это преобразование. Теперь представим себе, что мы все время параметризуем геометрические свойства физических объектов (причем ограничиваемся тремя измерениями), т. е. описываем пространственные положения материальных точек, их расстояния, углы, линии, поверхности и объемы, соответствующие форме и движениям материальных тел. Пространственное положение каждой точки задано тремя числами $x$, $y$, $z$ или $x_1$, $x_2$, $x_3$ — координатами. При коор-

динатном преобразовании новые координаты выражаются через старые уравнениями, вид которых зависит от характера преобразований. Остановимся на самой простой системе параметризации и на самом простом переходе от одной параметризации к другой. Возьмем дакартовы координаты, т. е. числа $x$, $y$, $z$ или $x_1$, $x_2$, $x_3$, выражающие длины перпендикуляров, опущенных из точки на три взаимно-перпендикулярные оси. Если вместо первоначальных осей мы выберем другие оси, то координаты $x_1$, $x_2$, $x_3$ переходят в другие координаты: $x_1'$, $x_2'$, $x_3'$. Если при этом прямоугольная система координат, т. е. система, образованная взаимно-перпендикулярными осями, переходит в другую прямоугольную систему, то перед нами ортогональное преобразование, при котором фигуры и тела движутся без деформации, не меняют внутренних свойств. Ортогональные преобразования включают не только движение, но и зеркальное отражение, т. е. изменение направления одной из осей на противоположное. Таким образом, фигура преобразуется при отражении в зеркале. Здесь также одна прямоугольная координатная система переходит в другую. Этот случай мы не будем рассматривать, ограничимся преобразованиями-движениями, из которых мы пока сравнительно подробно остановились на поворотах.

Преобразования, сводящиеся к повороту ортогональных координатных осей, образуют *группу* преобразований. С этим понятием мы сталкиваемся впервые. Множество преобразований образует группу, если два последовательных преобразования дают преобразование такого же класса и если каждому преобразованию соответствует обратное преобразование того же класса так, что последовательно примененные прямое и обратное преобразования дают тождественное преобразование, т. е. не меняют параметризации. Тождественное преобразование также входит в группу. Например, все однородные преобразования образуют группу, так как два однородных преобразования представляют собой также однородное преобразование и каждому однородному преобразованию соответствует обратное, тоже однородное преобразование. Ограничимся группами, с которыми придется сталкиваться и дальше. Преобразования, состоящие в повороте пространства с находящимися в нем телами вокруг некоторой точки или в переходе к новой системе координат, оси которой повернуты вокруг старых осей, образуют *группу*

*вращений.* Существует группа преобразований, которые можно физически представить как перенос тела на другое место без вращения, так что все точки описывают параллельные пути. Эта группа называется *группой параллельного переноса.* При таком переносе к координатам точки прибавляются некоторые постоянные величины.

Группа вращения и группа параллельного переноса образуют группу *линейных ортогональных преобразований,* при которых геометрическая фигура движется как жесткое целое, например листок с изображением фигуры передвигается произвольно по плоскому столу. Эти преобразования можно назвать *группой движения без деформации.* Поворотами и смещениями ограничивается движение недеформируемой фигуры или тела. Далее идет более общая *аффинная группа,* где геометрическая фигура может не только переноситься на другое место и поворачиваться, но и сжиматься, так что круг, например, превращается в эллипс. Общая аффинная группа уже не требует, чтобы прямоугольные координаты переходили в другие прямоугольные, как это было в ортогональной аффинной группе. Здесь мы имеем дело, вообще говоря, с косоугольными координатами. Соответственно отменяются условия ортогональности. Ортогональная аффинная группа входит в общую аффинную группу. Наиболее общий характер имеет группа топологических преобразований, при которых геометрические фигуры произвольно растягиваются, сжимаются, деформируются, но не могут испытать разрыва, так что преобразования ограничены лишь требованием непрерывности.

Характеризуя группы преобразований, мы незаметно перешли от указания «что изменяется» к указанию «что сохраняется». При координатных преобразованиях, как уже было сказано, некоторые геометрические величины и соотношения остаются неизменными. Некоторые пространственные свойства физических объектов независимы от параметризации, сохраняются при переходе к другой параметризации. Они называются *собственными,* а свойства, зависящие от параметризации,— *несобственными.*

Переход от несобственных свойств к собственным, переход от координат к инвариантам является важнейшей характеристикой теории относительности. Смысл слова «относительность» применительно к движению состоит в необходимости тела отсчета для регистрации и измере-

ния движения, в отсутствии внутренних изменений в движущемся теле, в неизменности собственных свойств этого тела, в инвариантности описывающих эти свойства величин. Классический принцип относительности был основан на инвариантности ускорений при переходе от одной инерциальной системы к другой. Основой классической механики служит инвариантность пространственных расстояний между точками и инвариантность интервалов времени при переходе от одной системы к другой без деформации, т. е. при ортогональных преобразованиях — в пределах группы движений. Основой специальной теории относительности служит инвариантность четырехмерного интервала, определяемого выражением

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2,$$

по отношению к лоренцовым преобразованиям. Лоренцовы преобразования — это переход от одной инерциальной системы к другой инерциальной системе. Посмотрим, каким должен быть инвариант более общего преобразования — перехода к системе отсчета, движущейся с ускорением.

Будем исходить из известной нам уже дифференциальной квадратичной формы, определяющей в эвклидовой геометрии расстояние между точками

$$dr^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2.$$

В случае иной геометрии расстояние может определяться иным выражением. Если, зная разности координат, мы можем определить расстояние между точками, иначе говоря, если нам известен вид функции, связывающей расстояние с координатами, то этим определена *метрика* пространства. Можно ли ввести общее выражение функции расстояния для различных пространств с различным определением метрики? Это можно сделать следующим образом.

В общем случае квадратичная форма включает не только квадраты $dx_\mu^2$ (т. е. $dx_\mu dx_\mu$), но $dx_\mu dx_\nu$ — попарные произведения различных дифференциалов координат. В эвклидовой геометрии эти попарные произведения, помимо квадратов, не входят в формулу, определяющую расстояние. Но в других геометриях они входят в многочлен с различными коэффициентами. Обозначим ко-

эффициенты буквой $g$ с двумя индексами, соответствующими индексам перемножаемых дифференциалов координат: коэффициент при произведении $dx_1 dx_1$ (т. е. $dx_1^2$) обозначим через $g_{11}$. Коэффициенты произведений дифференциалов различных координат, например $dx_1 dx_2$ или $dx_1 dx_3$, обозначим через $g_{12}$ или соответственно $g_{13}$ и т. д. Иначе говоря, коэффициенты произведений $dx_\mu dx_\nu$ обозначим через $g_{\mu\nu}$. Тогда мы сможет написать формулу, выражающую зависимость расстояния от координатных разностей в общем виде, пригодном не только для прямоугольных координат. В таком общем виде квадрат расстояния равен сумме квадратов координатных разностей, а также произведений *различных* координатных разностей. В сокращенной записи такая общая дифференциальная квадратичная форма будет иметь вид

$$dr^2 = \sum_{\mu,\nu=1}^{3} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu.$$

В случае ортогональных координат произведения *различных* координатных разностей исчезают (это можно учесть, приравнивая нулю коэффициенты при этих произведениях). В этом случае

$$g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1 \quad \text{и} \quad g_{12} = g_{13} = g_{21} = g_{23} = g_{31} = g_{32} = 0.$$

Иначе говоря, $g_{\mu\nu} = 1$, если $\mu = \nu$, и $g_{\mu\nu} = 0$, если $\mu \neq \gamma$.

Подставив эти значения $g_{\mu\nu}$ в общую формулу, мы и получаем для ортогональных координат краткую и простую формулу

$$dr^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2.$$

Для специальной теории относительности этой формулы, обобщенной на четырехмерное пространство — время, достаточно; для изучения общей теории относительности нам понадобится более общая формула. Если координатная система не прямоугольная, а косоугольная, то $g_{\mu\nu}$ имеют иные, не нулевые или единичные значения. Расположим коэффициенты $g_{\mu\nu}$ в таблицу:

$$g_{11} g_{12} g_{13},$$
$$g_{21} g_{22} g_{23},$$
$$g_{31} g_{32} g_{33}.$$

Написанные девять (если $g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}$, то шесть) коэффициентов дают возможность в каждой точке трехмерного пространства определить расстояние между двумя бесконечно близкими точками, т. е. определить инвариантные, не зависящие от выбора координатной системы свойства по внешним, изменяющимся при координатных преобразованиях свойствам. Эти коэффициенты определяют *метрику* пространства и образуют *фундаментальный метрический тензор*.

Значения компонент метрического тензора показывают, какой системой координат параметризовано изучаемое многообразие. Можно параметризовать каждое многообразие свойств или объектов различными системами координат; например, для двумерного пространства применяются прямоугольные, косоугольные, полярные координаты, а при изучении земной поверхности (тоже двумерного пространства) применяется система координат, состоящая из широт и долгот.

Если обобщить на четырехмерное многообразие метрические формулы, т. е. формулы, выражающие $dr$ через дифференциалы координат, то мы будем иметь десять коэффициентов $g_{\mu\nu}$, так как из шестнадцати компонент четырехмерного тензора второго ранга в данном случае (так называемого симметричного тензора) шесть компонент равны другим:

$$g_{12} = g_{21}, \quad g_{13} = g_{31}, \quad g_{14} = g_{41},$$
$$g_{23} = g_{32}, \quad g_{24} = g_{42}, \quad g_{34} = g_{43}.$$

По аналогии с *плоской* двумерной поверхностью, где возможны плоские двумерные декартовы координаты и где $g_{\mu\nu}$ равны нулю или единице, мы вводим понятие *плоского* четырехмерного многообразия, где $g_{\mu\nu} = 1$, когда $\mu = \nu$, и $g_{\mu\nu} = 0$, когда $\mu \neq \nu$.

Мы перешли от трехмерного пространства к четырехмерному многообразию. Можно пойти дальше и представить фундаментальный метрический тензор в еще более общей форме в $n$-мерном многообразии. Когда мы рассматриваем множество точек в чисто арифметическом смысле, т. е. множество упорядоченных систем, включающих $n$ чисел каждая, то каждым двум точкам $x_1, x_2, \ldots, x_n$ и $x_1', x_2', \ldots, x_n'$ соответствует число $r$, которое можно по аналогии назвать «расстоянием» в $n$-мерном «пространст-

ве». Квадрат такого числа будет равен:

$$dr^2 = \sum_{\mu,\,\nu=1}^{n} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu.$$

Коэффициенты

$$\begin{matrix} g_{11} g_{12} \cdots g_{1n} \\ g_{21} g_{22} \cdots g_{2n} \\ \cdots\cdots\cdots \\ g_{n1} g_{n2} \cdots g_{nn} \end{matrix}$$

образуют фундаментальный метрический тензор в $n$-мерном пространстве.

## 7. Кривизна четырехмерного мира

Теперь можно вернуться к общей теории относительности. Мы встретились там с затруднением: принцип эквивалентности имеет лишь локальное значение, в конечных областях Вселенной тяготение, вообще говоря, не эквивалентно ускорению. Идеальный мир «выпрямленного», однородного гравитационного поля и реальный мир со сходящимися силовыми линиями гравитационных полей совпадают друг с другом в бесконечно малых областях, как прямая и кривая линия, или как плоскость и кривая поверхность, или — переходя уже к менее наглядным образам — как «плоское» пространство трех, четырех, вообще $n$ измерений и пространство того же числа измерений, но искривленное.

Такая аналогия (она недолго оставалась простой аналогией) указывала путь к общековариантному выражению законов природы. Нужно было дополнить *локальный* принцип эквивалентности представлением о кривизне пространственно-временно́го континуума.

Кривизна пространственно-временно́го континуума выражается в изменении фундаментального метрического тензора. Поэтому Эйнштейну понадобились математические приемы, позволяющие зарегистрировать и выразить непрерывные изменения тензора $g_{\mu\nu}$ при переходе от одной мировой точки к другой. Для этого Эйнштейн в «Основах общей теории относительности» ввел некоторые основные понятия тензорного анализа, необходимые для систематического построения общей теории относитель-

ности. Тензорное исчисление уже существовало. Название «тензор» еще не появилось, но введенное Риччи и впоследствии Леви-Чивитой «абсолютное дифференциальное исчисление» и было теорией объектов, определенных в каждой координатной системе трехмерного пространства не тремя функциями, как векторы, а бо́льшим числом пространственных функций. Существовали уже представления о подобных объектах для многомерного пространства. Когда Риччи и Леви-Чивита создали свое «абсолютное дифференциальное исчисление», математики чувствовали, что обобщенные понятия, выросшие из векторного анализа, позволяют представить в математической форме физические закономерности, более глубокие и общие, чем закономерности, представимые в векторных понятиях. И действительно, в 1914—1916 гг. Эйнштейн сделал тензорное исчисление и тензорный анализ мощным аппаратом физического исследования.

Тензорный анализ должен был прежде всего выразить изменение компонент фундаментального метрического тензора. В неэвклидовых пространствах они, вообще говоря, меняются от точки к точке. Если компоненты фундаментального метрического тензора $g_{\mu\nu}$ и не равны нулю или единице, как в эвклидовом пространстве, но сохраняют одни и те же значения во всех точках, то такое пространство называется римановым пространством. Оно характеризуется постоянной кривизной. Римановым в *узком смысле* называется пространство постоянной *положительной* кривизны. Для него легко найти наглядный образ — поверхность обычной сферы. На ней теоремы эвклидовой геометрии двух измерений превращаются в теоремы геометрии Римана. Роль прямых переходит к кратчайшим на поверхности сферы, геодезическим линиям — к их числу, в частности, относятся дуги экватора и меридианов. На подобную линию можно опустить из одной точки два и больше различных перпендикуляров (например, из полюса на экватор).

Теперь оставим на время эти образы сферической геометрии — римановой двумерной геометрии — и перейдем к проблеме кривизны $n$-мерного неэвклидова (именно риманова) пространства. Тем самым мы еще дальше отходим от «картины мира» в обычном смысле. Напомним только, что даже в истории живописи в описаниях картин сообщают не только о сюжете, содержании, композиции,

колорите и т. д., но и о средствах, которыми пользовались художники. В таких описаниях встречаются выражения типа «масло, холст». Мы постараемся дать некоторое представление о математическом аппарате, позволившем Эйнштейну в 1916 г. прийти к новой теории тяготения. Таким аппаратом и была дифференциальная геометрия искривленных пространств, рисующая в общем виде их свойства.

Эйнштейн пользовался выражениями, измеряющими меру «неэвклидовости» пространства. Эти величины — коэффициенты «неэвклидовости» — изображаются символами, которые носят название символов или коэффициентов Кристоффеля.

В эвклидовом пространстве коэффициенты Кристоффеля обращаются в нуль. В римановом пространстве они приобретают различные, не равные нулю значения в зависимости от искривления пространства. В связи с этим вводится новое понятие, которого не знает эвклидова геометрия,— *ковариантная производная.*

При переносе из одной точки пространства в другую вектор, изображающий физическую переменную, вообще говоря, изменяется, и это изменение указывается обычной производной. Но при переносе вектора в искривленном пространстве компоненты вектора могут стать иными в силу искривления пространства. Чтобы определить независимое от координатной системы изменение вектора, мы вычитаем из обычной производной величину, зависящую от кривизны пространства (от значений символов Кристоффеля, входящих в выражение для кривизны), и получаем ковариантную производную. Если она равна нулю, то вектор изменяется только в силу кривизны пространства. Такой вектор совпадает по направлению с геодезической линией данного пространства.

Нахождение ковариантной производной называется ковариантным дифференцированием.

Что представляет собой ковариантное дифференцирование с точки зрения независимости физических объектов от их математической параметризации? Именно эта точка зрения и превращает историю математических приемов в историю физических идей. В данном случае речь идет о получении общековариантных уравнений, т. е. уравнений, независимых от преобразования координатных систем.

Обычная производная вектора не является инвариантом *общих* преобразований. Она совпадает с ковариантной производной в случае декартовых координат, которые могут быть всегда введены в эвклидовом пространстве. Ковариантная производная в этом случае переходит в обычную производную, так как член с коэффициентом Кристоффеля обращается в нуль. Поэтому можно предположить, что ковариантная производная, в общем случае не совпадающая с обычной, соответствует неэвклидовой геометрии и более общим, криволинейным координатам. Следовательно, ковариантное дифференцирование позволяет найти еще более устойчивые, независимые от преобразований фундаментальные соотношения, сделать еще один шаг в последовательном развитии инвариантного представления физических объектов.

Ковариантное дифференцирование позволяет отделить друг от друга изменение геометрического образа, объясняющееся изменением физического прообраза, и изменение геометрического образа, связанное с изменением метрики от точки к точке. При изменении физической величины в ее координатном отображении «скорость» изменения во времени (скорость без кавычек) или в пространстве (градиент) дополняется «поправочным изменением» — следствием кривизны пространства. Поэтому абсолютная мера «скорости» изменения изображенной вектором физической величины отличается от простой производной, с которой мы встречаемся в эвклидовом пространстве.

Если физически величина не изменяется, то изменение ее в криволинейных координатах целиком зависит от кривизны пространства. Разделив в этом случае общее изменение на две части — «абсолютное» («физическое») и «координатное», мы получим нулевое значение первой части. Геодезическая линия и есть линия, направление которой целиком определяется в каждой точке кривизной пространства и не испытывает никакого «абсолютного» изменения.

Может создаться представление, будто ковариантная производная — чисто математическое понятие, что мы присоединяем к «физическому» изменению вектора дополнительную величину, зависящую от произвольной, включающей криволинейные координаты, параметризации физического объекта. Пока мы только готовимся к

переходу в область общей теории относительности, с таким представлением можно мириться. Но самый переход к общей теории относительности как раз и состоит в физической интерпретации символов Кристоффеля, в установлении физических явлений, требующих введения дополнительных членов в выражения дифференциалов и производных, одним словом, в физическом истолковании искривления пространства.

Чтобы выяснить физический смысл символов Кристоффеля, нужно предварительно показать их связь с метрическим тензором $g_{\mu\nu}$.

Изменение тензора $g_{\mu\nu}$ свидетельствует о кривизне пространства. Изменения $g_{\mu\nu}$ совпадают с теми изменениями, которые вызываются кривизной пространства. Поэтому если из разности двух бесконечно близких тензоров $g_{\mu\nu}$ вычесть разность, образующуюся при параллельном переносе благодаря криволинейности координат, то в итоге никакой разности мы не обнаружим. При ковариантном дифференцировании $g_{\mu\nu}$ ведут себя как постоянные, их ковариантные производные равны нулю. Что касается символов Кристоффеля, то это выражения, составленные из обычных производных тензора $g_{\mu\nu}$. В этом нет ничего неожиданного: изменение метрического тензора — мера кривизны пространства, производные $g_{\mu\nu}$ выражают меру его изменения, с другой стороны, символы Кристоффеля непосредственно выражают искривление пространства в различных направлениях.

Символы Кристоффеля позволяют найти выражение, измеряющее всевозможные искривления во всевозможных направлениях и соответствующие (зависящие от кривизны пространства в данной точке) изменения метрического тензора $g_{\mu\nu}$ в данной точке. Это выражение называется тензором кривизны, или тензором Римана — Кристоффеля. Это понятие появилось у Римана в 1854 г. в работе «О гипотезах, лежащих в основании геометрии» (опубликованной в 1868 г.), а у Кристоффеля в 1869 г.

Когда речь идет о двумерном пространстве, тензор кривизны может получить очень простую наглядную интерпретацию. Когда-то Гельмгольц, чтобы пояснить понятие многомерного пространства, говорил о двумерных существах, обитающих на поверхности сферы. С тех пор эти существа так часто появлялись на страницах различных книг, что выросли в народ со своей собственной гео-

графией, астрономией и, во всяком случае, геометрией. Они могли бы измерять на обитаемой ими поверхности сумму углов треугольника. На плоскости она была бы равна 180°, на сфере она больше. Двумерные существа могли бы, таким образом, установить «неэвклидовость» своего мира и определить меру «неэвклидовости» — его кривизну.

Можем ли мы произвести аналогичные измерения кривизны трехмерного мира? Само по себе трехмерное пространство не допускает такого измерения, но его допускает четырехмерный пространственно-временной континуум. Четырехмерный континуум отступает от законов эвклидовой геометрии, и такое отступление мы наблюдаем в явлениях тяготения. Теория тяготения позволяет поэтому физическими методами решить вопрос, какие геометрические законы — законы Эвклида или законы Римана — дают более точное описание действительности. Поэтому теория тяготения Эйнштейна — общая теория относительности — является в некотором смысле *физической геометрией*.

## 8. Тяготение

Объяснение трехвековой загадки тождества инертной и тяжелой массы картиной эквивалентности тяготения и ускорения было выдающимся достижением. Создание стройной теории кривизны мира и выявление в ней возможности общековариантного представления физических законов в тензорных уравнениях — это, может быть, еще более значительное открытие. Но решающим звеном общей теории относительности было отождествление искривления мира с тяготением. Первая идея, идея эквивалентности, имеет собственно физический характер и служит обобщением старой галилеево-ньютоновой констатации тождества тяжелой и инертной массы и новых, выросших из электродинамики представлений о распространении света. Вторая идея, идея ковариантности уравнений, опиралась на некоторую систематизацию и развитие собственно математических понятий и методов, имевшихся у основателей тензорной алгебры, тензорного анализа, теории кривизны и многомерной геометрии. Третья идея, тождество гравитационных и метрических полей, связь между метрикой и сосредоточиями масс, уже не физическая идея в старом смысле и не собственно мате-

матическая. Это идея физической геометрии. Эйнштейн нашел в тяготении физическое явление, показывающее, какова метрика пространства, т. е. создал возможность физического исследования геометрии мира, которая тем самым стала физической наукой, обладающей экспериментальными критериями.

Физическая интерпретация «неэвклидовости», или кривизны четырехмерного пространства, и связанных с ней понятий (неравных единице или нулю компонент $g_{\mu\nu}$, неравных нулю коэффициентов Кристоффеля, тензора Римана — Кристоффеля) основана на следующих соображениях. Свободная частица движется таким образом, что ее мировая линия между двумя мировыми точками, состоящая из бесконечно малых четырехмерных интервалов $ds$, оказывается кратчайшей. Пространство специальной теории относительности — эвклидово пространство, поэтому кратчайшей линией является здесь прямая. Если взять трехмерное пространственное сечение $x_1x_2x_3$ четырехмерного мира, то мы увидим пространственную трехмерную проекцию мировой линии свободной частицы — она будет прямой. Это и означает известную со времен Декарта прямолинейность инерционного движения. В двумерных сечениях $x_1x_4$, $x_2x_4$, $x_3x_4$, т. е. в пространственно-временны́х графиках движения частицы по направлениям пространственных осей, проекции мировой линии свободной точки также будут прямыми. Это означает известную уже Галилею равномерность инерционного движения.

Теперь обратимся к частице, движущейся в гравитационном поле. Самая суть современного учения об инерции и тяготении — общей теории относительности — состоит в утверждении, что движение частицы в гравитационном поле, так же как и движение свободной частицы, определяется кратчайшей мировой линией. Тяготение же означает лишь иное выражение для элементов $ds$ этой линии. Точнее, мировой линией частицы в гравитационном поле является геодезическая линия в неэвклидовом пространственно-временно́м мире. Неэвклидовость мира проявляется в изменении выражения $ds$, в переходе от выражения

$$ds^2 = \sum_{\mu,\,\nu=1}^{4} g_{\mu} dx_{\mu} dx_{\nu},$$

где $g_{11} = g_{22} = g_{33} = g_{44} = 1$ и $g_{\mu\nu} = 0$, если $\mu \neq \nu$, к тому же выражению

$$ds^2 = \sum_{\mu,\,\nu=1}^{4} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu,$$

где $g_{\mu\nu}$ — функция координат.

Изменение метрики мира означает, что геодезические линии вообще уже не прямые. Их проекции на гиперповерхность $x_1x_2x_3$ также могут быть кривыми; это пространственное искривление соответствует нормальному (в простейшем случае — центростремительному) ускорению. Проекции мировой линии на поверхности $x_1x_4$, $x_2x_4$ и $x_3x_4$ также могут быть кривыми (тангенциальное ускорение).

В механике специальной теории относительности пользуются далеко идущей аналогией между трехмерным пространством $x_1x_2x_3$ и четырехмерным псевдоэвклидовым миром $x_1x_2x_3x_4$. Роль, которую в классической механике в отношении $x_1x_2x_3$ играло время, в отношении $x_1x_2x_3x_4$ играет мировой интервал. Четыре производные мировых координат по интервалу называются компонентами *четырехмерной скорости*. Производные от четырехмерной скорости по мировому интервалу, т. е. вторые производные координат, называются *четырехмерными ускорениями*. Уравнение движения свободной частицы получается приравниванием четырехмерных ускорений нулю. Суть общей теории относительности Эйнштейна состоит в том, что в случае гравитационного поля это уравнение не отменяется, а обобщается на криволинейные четырехмерные координаты.

В новой теории тяготения символы Кристоффеля играют роль *напряженностей* силового поля, а производные тензора $g_{\mu\nu}$ — роль потенциалов поля тяготения. Мы могли бы поставить здесь слова «сила» и соответственно «напряженность» и «потенциал» в кавычки, потому что в классической механике начиная с Ньютона (у Галилея этого не было) сила рассматривается как нечто постороннее по отношению к геодезическим линиям пространства, по которым движется частица. Здесь же движение свободной частицы и движение частицы в гравитационном поле в равной мере происходят по геодезическим линиям, только линии эти различные; в первом случае — прямые, во втором, общем случае — кривые.

Итак, в новой теории тяготения — общей теории относительности — роль потенциалов играют компоненты фундаментального метрического тензора, а его производные определяют напряженности, роль которых играют коэффициенты Кристоффеля.

Такая физическая интерпретация при всей своей неожиданности очень естественна. Если тензор кривизны равен нулю, коэффициенты Кристоффеля равны нулю, компоненты $g_{\mu\nu}$ — постоянные величины (надлежащим выбором системы координат их можно сделать равными единице и нулю, т. е. прийти к специальной теории относительности), то четырехмерная геометрия мира соответствует однородному гравитационному полю, которое может быть устранено. Если же тензор кривизны не равен нулю и компоненты $g_{\mu\nu}$ — переменные величины, то геометрия мира соответствует неустранимому гравитационному полю. Естественно предположить, что компоненты реальных гравитационных полей служат физическим прообразом коэффициентов Кристоффеля, а потенциалы гравитационных полей — прообразом компонент $g_{\mu\nu}$. Тогда общековариантная форма уравнения свободного движения материальной точки остается справедливой и для того случая, когда в гравитационном поле нельзя выбрать координатную систему, в которой коэффициенты $g_{\mu\nu}$ приобретают значения специальной теории относительности.

В этом состоит программа, намеченная в первых параграфах и выполненная в последующем содержании «Основ общей теории относительности», где излагается новая теория тяготения.

Значения компонент метрического тензора $g_{\mu\nu}$ в различных точках четырехмерного пространственно-временно́го континуума составляют $g$-поле, которое характеризует и движение тяжелых тел, и скорость распространения света, и метрику пространства и времени.

В этом основное содержание общей теории относительности. Она принадлежит к числу великих обобщений, которые всегда будут поражать людей своей смелостью и широтой. Такова мысль Галилея об инерционном движении, мысль Ньютона о тяготении, объясняющем мироздание, мысль Лобачевского о зависимости геометрических свойств пространства от физических процессов, мысль Эйнштейна о постоянстве скорости света и изменчивости пространственных и временны́х масштабов. К ним принад-

лежит и идея тождества гравитационных и метрических полей.

При построении общей теории относительности Эйнштейн формулирует общий принцип, обеспечивающий выражение физического закона понятиями и величинами, независимыми от параметризации, и сразу же переходит к содержанию этого закона. Искривления пространственно-временно́го континуума, или, что то же самое, гравитационные поля, зависят от наличия тяжелых масс. Тяжелые массы равны инертным массам и, следовательно, пропорциональны полным энергиям. Отсюда можно заключить, что метрическое поле зависит от полной энергии, создающей это поле материальной системы, состоящей из вещества в обычном смысле и электромагнитных полей. В уравнении гравитационного поля, которое было выведено Эйнштейном, слева стоят компоненты тензора кривизны пространства — времени, а справа — компоненты тензора энергии — импульса. Эйнштейн дополнил это уравнение, связывающее тензор кривизны $R_{\mu\nu}$ с тензором энергии-импульса $T_{\mu\nu}$, четырьмя соотношениями, которые выражают фундаментальное свойство уравнения: оно остается справедливым при переходе к другой четырехмерной системе отсчета. Такой переход может происходить по осям $x_1$, $x_2$ и $x_3$, т. е. в пространстве, а также вдоль оси $x_4$, т. е. во времени. Речь идет, таким образом, о ковариантности уравнения гравитационного поля по отношению к пространственно-временны́м сдвигам. Указанные четыре выражения соответствуют четырем законам сохранения: сохранения составляющих импульса **p** (сохранения $p_x$, $p_y$ и $p_z$) и сохранения энергии $E$.

В заключительной главе этой книги в связи с современной переоценкой законов сохранения импульса и энергии мы подробнее остановимся на этой стороне общей теории относительности.

В дальнейшем Эйштейну и его ученикам, а также В. А. Фоку, удалось вывести из уравнений гравитационного поля уравнения движения материальной точки. В классической физике уравнения поля и уравнения движения независимы. Например, классическая электродинамика включает независимые друг от друга уравнения: во-первых, уравнения, описывающие закономерное возникновение и распространение поля, во-вторых, уравнения движения частицы в силовом поле. В электродинамике

Максвелла известные уравнения, связывающие заряды и токи с напряженностями магнитных и электрических полей, существуют независимо от уравнений движения, в которых, с одной стороны, фигурирует лоренцова суммарная сила, действующая на электрон, а с другой — скорость и ускорение электрона. Уравнения поля и уравнения движения независимы, и это выражается в их линейности. Электромагнитное поле мы считаем независимым от движущейся под его воздействием частицы. Мы делим поле на две части: поле рассматриваемой частицы и поле всех остальных частиц. Первую часть мы исключаем и принимаем во внимание лишь поле, которое существовало бы в данной точке в отсутствие рассматриваемой частицы, т. е. поле, создаваемое остальными заряженными точками, неподвижными и движущимися. Поэтому электромагнитное поле, действующее на рассматриваемую частицу, линейным образом зависит от токов и зарядов. В свою очередь, движение частицы, описываемое уравнениями движения, не изменяет поля, и поэтому здесь уравнения также линейны. Но в теории тяготения Эйнштейна фигурируют нелинейные уравнения поля, иначе говоря, гравитационные поля действуют друг на друга. Поэтому представляется возможным отказаться от независимости уравнений поля и уравнений движения и вывести уравнения движения из уравнений поля. Эйнштейн и Громер поставили такую задачу в 1927 г.[35], а в 1937—1939 гг. Эйнштейн, Инфельд и Гоффман решили ее[36]. Одновременно к этому открытию пришел и В. А. Фок[37]. Он получил уравнения движения не для материальных точек, а для тел конечного объема.

## 9. Проверка общей теории относительности

Доказательством точности новой теории тяготения и приближенного характера ньютонова закона было наблюдение отклонения света в гравитационном поле Солнца. Теоретическое доказательство и обнаружение гравитаци-

---

[35] См. A. Einstein. Sitzungsber. d. Preuss. Akad. d. Wiss., 1927, S. 235.

[36] См. A. Einstein, L. Infeld, B. Hoffman. Ann. of Math., v. 139, 1938, p. 65; A. Einstein, L. Infeld. Ann. of Math., v. 41, 1940, p. 655.

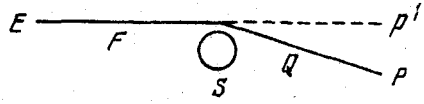
[37] См. В. А. Фок. ЖЭТФ, т. 9, 1939, стр. 375.

онной массы у света — необходимая предпосылка общей теории относительности. Гравитационное поле может быть представлено как искривление пространства и времени только потому, что оно одинаковым образом влияет на все физические объекты независимо от констант, характеризующих эти объекты. Все физические прообразы прямой — все прямые мировые линии, соответствующие движению частицы по инерции (независимо от массы частицы) и распространению каждой точки фронта световой волны,— испытывают одно и то же воздействие, и именно поэтому такое воздействие можно представить как искривление пространства — времени. Если бы тяготение не действовало на свет, оно бы не могло быть представлено как изменение геометрических свойств пространства — времени, тогда и принцип эквивалентности потерял бы силу: в ящике, испытывающем ускорение, свет менял бы направление, а в покоящемся ящике, в котором действует поле тяготения, направление света не менялось бы, и это доказало бы абсолютный характер его покоя.

Вблизи тяжелой массы происходит искривление светового луча, так как участок фронта волны, проходящий ближе к тяжелой массе, задерживается и волна изменяет направление, фронт волны несколько поворачивается. Отклонение это было вычислено и для луча, проходящего возле поверхности Солнца, составило 1,75″, если принимать во внимание искривление времени и пространства, вытекающее из закона тяготения Эйнштейна. Если же принимать во внимание только одну часть искривления — притяжение к Солнцу, соответствующее закону Ньютона, то получается вдвое меньшее отклонение — 0,87″.

Таким образом, были найдены величины, допускавшие проверку, которая означает проверку общей теории относительности в целом. Такая проверка соответствует измерению суммы углов сферического треугольника, предпринятому плоскими обитателями поверхности сферы. Отклонение света в поле тяготения Солнца свидетельствует о неэвклидовом характере мира, т. е. о правильности общей теории относительности. Если величина отклонения луча у самой поверхности Солнца достигает величины, близкой к 1,75″, то можно сказать: закон тяготения Эйнштейна дает более точное описание действительности, а закон Ньютона — приближенное (достаточное для подавляющего большинства явлений).

Такая проверка была произведена 20 мая 1919 г. Руководил ею Эддингтон. Рассказ об астрономических экспедициях 1919 г. в книге Эддингтона «Пространство, время и тяготение» называется: «Взвешивание света». По существу речь шла именно о взвешивании светового луча. Точка фронта световой волны, проходя вдоль поверхности Земли, падает на 5 *м* (закон Ньютона) или на 10 *м* (закон Эйнштейна) в секунду, подобно тому как горизонтально выпущенный снаряд благодаря своей тяжести через секунду окажется несколько ниже горизонтальной линии. Но свет проходит 300 000 *км* в секунду, поэтому искривление его пути на Земле не может быть обнаружено самыми точными измерениями. Вблизи поверхности Солнца тяготение в 27 раз больше и искривление луча достигает, как мы видели, величины порядка секунды, улавливаемой астрономическими наблюдениями.




Схема, заимствованная из книги Эддингтона, показывает, что астроном на Земле (точка *E*) увидит звезду *P* смещенной в точку *P'*, так как луч этой звезды *PQFE* заметным образом изменил направление вблизи поверхности Солнца *S* — на участке *QF* — и дошел до астронома, имея направление *FE*. В этом направлении и будет видна звезда.

Звезды, видимые близ солнечного диска, т. е. звезды, лучи которых проходят вблизи Солнца, можно наблюдать лишь во время солнечного затмения. Как раз во время затмения 29 мая 1919 г. солнечный диск должен был пройти через группу очень ярких звезд, и Эддингтон еще в начале 1917 г. обратил внимание английских астрономов на это обстоятельство. Сам он два года спустя, после длительной подготовки экспедиций, отправился на остров Принчипе в Гвинейском заливе, а другая экспедиция выехала в Собраль в Северную Бразилию, где также проходила полоса полного солнечного затмения.

На острове Принчипе, несмотря на облачную погоду, удалось сделать с помощью телескопа 16 снимков с экспозицией от 2 до 20 *сек*. На одном из снимков были отчетливо видны изображения пяти звезд вблизи Солнца. Пла-

стинка была положена на другую, на которой был сфотографирован тот же участок неба, но в отсутствие Солнца. Сдвиги изображений измерили микрометрической машиной. Экспедиция в Собрале, фотографировавшая затмение с помощью двух телескопов под безоблачным небом Бразилии, получила большое число снимков. Результаты, полученные на одном из телескопов, отличались от результатов наблюдений на острове Принчипе, но они были взяты под сомнение по ряду обстоятельств, сопровождавших наблюдение (например, нагревание аппаратуры солнечными лучами). Вторая серия бразильских фотографий (с помощью второго телескопа) отличалась бо́льшей точностью, и их ожидали с нетерпением, как решающих. Они действительно дали окончательный ответ на один из коренных вопросов науки. Наблюдавшиеся отклонения (в Собрале $1{,}98'' \pm 0{,}12''$, на острове Принчипе $1{,}61'' \pm \pm 0{,}30''$) подтвердили величину, вытекающую из закона Эйнштейна ($1{,}74''$), и исключили вдвое меньшую величину, соответствующую закону Ньютона.

Результаты астрономических экспедиций 1919 г. вызвали значительный перелом в развитии общей теории относительности. Новый период характеризуется более широким фронтом исследований. Физики в своей основной части примкнули к новой идее, и началась ее быстрая коллективная разработка. Подтверждением общей теории относительности было не только наблюдавшееся отклонение лучей звезд в поле тяготения Солнца. Новая теория объяснила результаты астрономических наблюдений, производившихся гораздо раньше и ставивших в тупик астрономов в течение многих десятилетий. Речь идет о противоречащих ньютонову закону тяготения особенностях движения Меркурия.

Такого рода отклонения крайне незначительны. При исследовании поведения световых лучей трудность зависит от большой скорости света, по сравнению с «обычными» скоростями. Угол отклонения лучей в поле тяготения Солнца мал потому, что падение света на Солнце в течение секунды на несколько метров мало́ по отношению к пройденному в течение секунды расстоянию в 300 000 *км*. Напротив, отклонения планет от движения, предсказанного законом Ньютона, малы потому, что малы их скорости по сравнению со скоростью света. И в том и в другом случае наблюдения должны как-то перешагнуть порог, от-

деляющий мир медленных движений от мира быстрых движений. В части планетных движений отсутствие современных точных приборов компенсировалось в XVIII—XIX вв. накоплением отклонений при их повторении в течение десятилетий. Так были открыты отклонения движения Меркурия от эллиптической орбиты.

Ньютонов закон тяготения обязывает планету двигаться строго по эллипсу. Закон Эйнштейна предопределяет небольшое отклонение: эллипс не смыкается, или, что то же самое, он ежегодно поворачивается в направлении движения планеты. Величина ежегодного поворота, если принять полный поворот перигелия орбиты за единицу, измеряется дробью $3\ v^2/c^2$, где $v$ — скорость движения планеты, а $c$ — скорость света. Для Меркурия, планеты с выраженным эксцентриситетом орбиты, позволяющим точно определить положение перигелия, и со сравнительно большой скоростью движения, указанная дробь соответствует повороту перигелия на $43''$ в течение ста лет.

Наблюдавшийся поворот орбиты Меркурия составляет $574''$ в столетие, из них $532''$ объясняются возмущающим действием других планет. Остаток, поворот на $42''$, с большой точностью объясняет теория Эйнштейна.

Есть еще один путь исследования неэвклидовых свойств пространства и проверки законов тяготения Ньютона и Эйнштейна — прямой путь измерения интервала $d\tau$. Этот путь состоит в сравнении периодов колебаний, дающих определенную линию спектра, в различных гравитационных полях. В четырехмерном мире начало и конец колебания (т. е. два последовательных состояния атома, характеризующихся одинаковой фазой) представляют собой две мировые точки. Их разделяет интервал $d\tau$. Представим себе теперь два атома, испускающих свет одной и той же частоты, соответствующей одной и той же спектральной линии, т. е. испытывающих одни и те же колебания. Один атом находится на Солнце, другой — на Земле. Интервал колебания на Солнце, где гравитационное поле сильнее, будет больше, чем на Земле: тяготение искривит отрезок мировой линии между началом и концом колебания. Соответственно удлинится волна испускаемого света. Спектральные линии солнечного света по сравнению с земными источниками будут сдвинуты в сторону более длинных волн, т. е. к красному концу спектра. Спектроскопические наблюдения в общем подтвердили предположение

о таком гравитационном «красном смещении», но пока еще не достигнуто количественное совпадение наблюдаемого смещения со смещением, вытекающим из *теории тяготения Эйнштейна*. Для звезд с более высокой плотностью вещества, чем Солнце, еще легче заметить гравитационное смещение спектральных линий. Например, для спутника Сириуса, принадлежащего к числу так называемых «белых карликов», смещение в 30 раз больше, чем для Солнца. В этом случае наблюдения также подтвердили существование гравитационного смещения, но и здесь еще нет точного количественного совпадения с выводами теории Эйнштейна.

Экспериментальная проверка общей теории относительности дает ответ на самые коренные проблемы научной картины мира, поэтому новые возможности такой проверки знаменуют собой важный этап в общей истории науки. Такие принципиально новые возможности появились в конце 50-х годов.

В 1958 г. Мёссбауэр открыл некоторые особенности поглощения гамма-лучей, позволяющие определить длину волны этих лучей с большей точностью, исключив влияние отдачи излучающего ядра. Он нашел, что атомы в кристаллических решетках излучают гамма-кванты практически без отдачи. Такие гамма-лучи обладают очень узкими спектральными линиями. Наблюдая резонансное поглощение подобных «безотдачных» лучей, можно измерить очень малые сдвиги спектральных линий. Паунд и Ребка обратили внимание на возможность использования этого открытия для измерения гравитационного смещения в условиях Земли. Они наблюдали сдвиг уровней ядер на различной высоте в гравитационном поле Земли и довольно точно подтвердили теоретические выводы, сделанные на основе общей теории относительности.

Теперь мы перейдем к наиболее важному применению общей теории относительности для перестройки научной картины мира. Общая теория относительности, в отличие от специальной теории, еще не стала опорой учения о микромире, хотя необходимость ее привлечения к решению проблем микромира становится все более ясной. Общая теория относительности преобразовала представление о Вселенной — не только о звездах и галактиках, но и о том, что мы называем Вселенной в целом.

## 10. Мир как целое

Через год после появления «Основ общей теории относительности» Эйнштейн выступил со статьей «Вопросы космологии и общая теория относительности»[38]. В ней рассматривается Вселенная в целом. Это выражение нельзя понимать буквально. Речь идет о пространстве, в котором пренебрежимо малы расстояния между галактиками. В теории поля иногда рассматривают условия в точках, настолько удаленных от рассматриваемой системы, что ее поле можно считать равным нулю. Условия эти называются «условиями на бесконечности». Если изучать «условия на бесконечности» при удалении от известных нам галактик, то область, на границах которой существуют эти условия, может быть названа «Вселенной в целом». В классической физике попытки описать условия на бесконечности, т. е. рассматривать мир как целое, приводили к противоречиям. Если применить ньютонову теорию тяготения к бесконечному миру как целому, то силы, действующие на каждое тело, представятся бесконечными. В бесконечной Вселенной, заполненной материей со средней ненулевой плотностью, действуют бесконечные силы, и тогда известные нам конечные силы не могут действовать на тела. Ньютонов гравитационный потенциал будет иметь конечное значение, если материя мира представляет собой составленный из галактик остров в бесконечном пустом пространстве или если плотность масс убывает и стремится к нулю быстрее, чем $1/r^2$. В этом последнем случае общая масса материи мира может быть бесконечной. Потенциал тогда будет конечным и на бесконечности обратится в нуль. Но такое предположение, законное с точки зрения классической теории тяготения, противоречит классической статистической теории. Бесконечное число небесных тел в мировом пространстве следует рассматривать как космический газ. Из кинетической теории газов следует, что остров космического газа, окруженный бесконечной пустотой, давно бы «испарился». Излучаемая материя и даже целые небесные тела ушли бы из заполненного материей острова в окружающий океан пустого пространства.

---

[38] А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I. М., 1965, стр. 601—612.

Если Вселенная бесконечна, то устранить гравитационный парадокс — бесконечные значения гравитационного потенциала — можно двумя путями. Первый путь — предположение об уменьшении плотности вещества во Вселенной при возрастании расстояний. Если при переходе ко все большим масштабам сохраняется та же средняя плотность вещества во Вселенной, мы получаем бесконечные значения гравитационного потенциала. Если при возрастании расстояния $r$, которое мы вводим в формулу гравитационного потенциала, средняя плотность стремится к нулю не быстрее, чем $1/r^2$, то гравитационный парадокс сохраняется. Он исчезает — гравитационный потенциал приобретает конечные значения,— если плотность при возрастании $r$ стремится к нулю быстрее, чем $1/r^2$. Такое быстрое уменьшение плотности можно представить себе, если допустить иерархическое строение Вселенной: каждая система входит в более крупную, включающую систему, причем размеры систем неограниченно растут, а средняя плотность вещества в каждой системе высшего порядка неограниченно уменьшается. Подобная картина Вселенной появлялась уже в XVIII в. В 1908—1922 гг. Шарлье нашел количественные соотношения между возрастанием размеров систем и уменьшением плотности, при которых исчезает гравитационный парадокс.

Второй путь устранения бесконечных значений — модификация ньютонова закона тяготения, предположение о более быстром уменьшении сил тяготения с расстоянием, чем это следует из закона Ньютона. Указанный закон устанавливает обратную пропорциональность силы тяготения и квадрата расстояния: сила тяготения уменьшается с расстоянием пропорционально $1/r^2$. Можно представить себе, что сила тяготения уменьшается с расстоянием быстрее, но уже не за счет более быстрого, чем $1/r^2$, уменьшения плотности (как это сделано в схеме Шарлье), а за счет иной, чем у Ньютона, зависимости силы тяготения от расстояния. Закону Ньютона соответствует уравнение Пуассона для гравитационного потенциала

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}=4\pi\gamma\rho,$$

где $\rho$ — плотность массы, а $\gamma$ — постоянная всемирного тяготения. Заменив сумму вторых производных по координа-

там символом $\Delta$ (оператор Лапласа), мы получаем уравнение Пуассона в виде

$$\Delta\Phi = 4\pi\gamma\rho.$$

Нейман и Зелигер в конце прошлого века заметили, что для устранения гравитационного парадокса нужно заменить это уравнение иным — ввести в него некоторую величину, которая заставляет гравитационный потенциал падать быстрее при увеличении расстояния и той же средней плотности и постоянной всемирного тяготения. Тогда уравнение Пуассона переходит в уравнение

$$\Delta\Phi - \Lambda\Phi = 4\pi\gamma\rho,$$

где $\Lambda$ — постоянная величина — *космологическая константа.*

Эйнштейн ввел вместо ньютоновского закона новый закон тяготения. В уравнении гравитационного поля, с одной стороны, находятся величины, характеризующие метрику, или, что то же самое, кривизну пространства — времени, а с другой стороны,— тензор энергии-импульса. Но и эйнштейновская теория, подобно ньютоновой теории тяготения, сталкивается в случае бесконечной Вселенной с рядом затруднений, из которых мы упомянули гравитационный парадокс.

Эйнштейн предположил, что мировое пространство конечно. Не космический «остров» отделен «береговой линией» от безбрежного океана, а сам океан имеет конечные размеры, несмотря на отсутствие ограничивающих его берегов. Можно ли это представить себе наглядно? Если речь идет о двумерном пространстве, то конечность размеров при отсутствии границ может быть представлена очень просто. Поверхность сферы нигде не имеет «берегов», границ, и тем не менее ее площадь конечна. Мы можем представить себе (разумеется, не столь наглядно) кривизну трехмерного пространства, некоторую трехмерную сферическую поверхность, ограниченную по своей трехмерной «площади», т. е. по своему объему. Речь идет не о кривизне четырехмерного мира в окрестностях тяжелых масс, а о кривизне трехмерного пространства в целом.

В статье 1917 г. Эйнштейн пришел именно к такому представлению. Если рассматривать ограниченное по размерам пространство Эйнштейна в четырехмерном пространственно-временно́м мире, то получаются три измере-

ния с постоянной кривизной и одной измерение (время) неискривленное. Это напоминает поверхность цилиндра: одно измерение искривлено, и в этом смысле конечно, другое измерение не искривлено и бесконечно. Отправившись в путешествие по поверхности цилиндра вокруг его оси, мы вернемся к исходному пункту пути. Путешествие по поверхности цилиндра вдоль образующей, т. е. параллельно оси, неограниченно и может продолжаться бесконечно без возвращения. Мир Эйнштейна, искривленный и ограниченный в пространстве и не искривленный во времени, называется поэтому *цилиндрическим миром.*

Какова кривизна мирового пространства?

Эйнштейн исходил из однородности и изотропности пространства. Совокупность известных нам фактов не предопределяет такой точки зрения. Проследить, куда может привести мысль об изотропности и однородности пространства,— это значит только проиллюстрировать характер проблемы мира как целого. Пока нет возможности на основе наблюдений и экспериментов произвести выбор между различными гипотезами о структуре мира, остается проследить выводы хотя бы одной из них. Наиболее простой представляется мысль об однородности и изотропности пространства в целом. Однородность и изотропность пространства означает, что можно выбрать единое для Вселенной время, в каждый момент которого общая метрика пространства повсюду и во всех направлениях одна и та же, что соответствует постоянной положительной, отрицательной или нулевой кривизне. Переводя все эти предположения на язык геометрии, можно сказать: если пространство в целом обладает той или иной кривизной, т. е. является *пространством Римана в широком смысле*, то оно может быть либо пространством Римана в узком смысле (постоянная положительная кривизна), либо пространством Лобачевского (постоянная отрицательная кривизна), либо пространством Эвклида (нулевая кривизна).

Пространство постоянной положительной кривизны называют *сферическим.* Обычная сфера в обычном трехмерном пространстве дает основу для наглядного представления двумерного риманова пространства, так как поверхность сферы — это риманова двумерная поверхность. Чтобы воспользоваться подобной аналогией для риманова трехмерного пространства, нужно ввести *фиктивное* четырехмерное пространство и в нем трехмерную сферу —

изотропную гиперповерхность. Геометрия на этой гиперповерхности будет соответствовать метрическим соотношениям изотропного пространства постоянной положительной кривизны. Уделим несколько строк этой геометрии.

В четырехмерном пространстве уравнение гиперсферы имеет вид

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = a^2,$$

где $a$ — радиус гиперсферы, который соответствует радиусу кривизны рассматриваемого нами изотропного пространства. Изучая метрические соотношения на поверхности сферы, мы убеждаемся, что отношение длины окружности, проведенной на этой поверхности, к радиусу окружности меньше $2\pi$. На очень маленькой площадке разница неощутима, а при увеличении окружности ее отношение к радиусу все больше будет отличаться от $2\pi$. Возьмем любую точку поверхности нашей сферы и будем описывать окружности, все увеличивая радиус. Длина окружности будет расти, но не пропорционально радиусу, отношение окружности к радиусу будет все время уменьшаться, окружность будет расти все медленнее, и, когда радиус станет равным $\pi a/2$, длина окружности достигнет наивысшего значения $2\pi a$ и при дальнейшем увеличении радиуса начнет уменьшаться. Когда же радиус дойдет до противоположного полюса, т. е. станет равным $\pi a$, окружность стянется в точку. Разумеется, $\pi a$ — наибольшее расстояние, вообще возможное на сфере.

Теперь перейдем к непредставимой столь наглядно трехмерной сферической гиперповерхности радиуса $a$ в фиктивном четырехмерном пространстве. В таком трехмерном пространстве (римановом пространстве в узком смысле) пространственная метрика будет аналогична только что рассмотренному случаю. Геометрия на двумерной сферической поверхности с увеличивающимися окружностями уступает место геометрии трехмерного риманова пространства со все бо́льшими сферами. Поверхности этих сфер аналогично ранее рассмотренным длинам окружностей не пропорциональны радиусам: сначала они растут, при радиусе $\pi a/2$ достигают максимального значения, и при наибольшем радиусе (наибольшем расстоянии в таком пространстве) $\pi a$ обращаются в точку. Объем такого про-

странства постоянной положительной кривизны конечен. Конечность трехмерного пространства при отсутствии границ также допускает аналогию с двумерной сферической поверхностью. Можно было бы и здесь апеллировать к гельмгольцевым плоским обитателям сферической поверхности. Радиус трехмерной римановой сферы соответствует радиусу окружности на двумерной сферической поверхности, поверхность римановой сферы соответствует длине окружности, конечный объем римановой сферы аналогичен конечной площади обычной сферической поверхности. Но мы рассматривали поверхность обычной сферы в трехмерном пространстве, имеющем несомненный физический смысл. Что же касается риманова (в узком смысле) пространства с постоянным радиусом кривизны $a$, то его можно представить в виде сферы в фиктивном четырехмерном пространстве.

Перейдем теперь ко второй гипотезе: пространство обладает постоянной отрицательной кривизной. Такое пространство соответствует геометрии Лобачевского и называется гиперболическим. В 1868 г. Бельтрами показал, что двумерная геометрия Лобачевского осуществляется на поверхности фигуры типа грамофонной трубы, подобно тому как двумерная геометрия Римана имеет место на поверхности сферы. Поверхность типа грамофонной трубы, на которой реализуется двумерная геометрия Лобачевского, называется псевдосферой. Геометрические соотношения на поверхности псевдосферы соответствуют геометрии Лобачевского на плоскости. Возьмем поверхность псевдосферы и, не обращая внимания на ее ориентировку в пространстве, на то, что она изогнута, будем рассматривать независимые от этих изгибов свойства фигур. Изгибание не меняет расстояний на поверхности; эти расстояния мы, следовательно, и будем рассматривать. Независимые от внешней ориентировки геометрические свойства, как нам уже известно, образуют внутреннюю геометрию. Внутренняя геометрия псевдосферы — это геометрия Лобачевского. Теперь представим себе, что метрические свойства трехмерного пространства подчиняются геометрии Лобачевского. Иными словами, в трехмерном пространстве существуют соотношения между фигурами, аналогичные соотношениям двумерных фигур на псевдосфере (например, соотношение между радиусом и поверхностью шара так же отступает от эвклидова соот-

ношения, как в двумерной геометрии на псевдосфере соотношение между радиусом и длиной окружности). В этом случае пространство можно назвать псевдосферическим. По аналогичным соображениям пространство, подчиняющееся геометрии Римана (в узком смысле), называется сферическим. Поверхность сферы и поверхность псевдосферы отличаются кривизной: в одном случае она положительна, в другом — отрицательна. Поверхность псевдосферы, в отличие от поверхности сферы, растет неограниченно. Аналогичным образом трехмерное пространство отрицательной кривизны, в отличие от пространства положительной кривизны, бесконечно.

Третья гипотеза изотропного пространства — пространство с нулевой кривизной. В нем действуют соотношения, соответствующие эвклидовой геометрии на плоскости. Эвклидова геометрия на плоскости означает, например, что длина окружности равна $2\pi r$, соответственно в эвклидовом пространстве поверхность шара равна $4\pi r^2$. Наличие подобных соотношений и позволяет назвать эвклидов мир плоским.

Эйнштейн приписал мировому пространству положительную кривизну и соответственно конечный объем. Понятие конечного пространства, выражающее его метрические свойства, в отличие от физически непредставимого понятия ограниченного пространства, является физически содержательным. Представим себе движение тела, не испытывающего существенных воздействий со стороны локальных полей. Оно будет двигаться по геодезической, соответствующей общей кривизне пространства. Если эта кривизна имеет постоянное и положительное значение во всей Метагалактике, траектория тела будет замкнутой. Таким же образом будет распространяться свет — световой луч опояшет Метагалактику и может доставить изображение источника света. В этом случае не исключено получение двух изображений с двух противоположных сторон, причем это будут изображения одного и того же объекта, одной и той же звезды, доставленные двумя лучами, огибающими мир по замкнутой кривой [40]. Как бы ни были далеки подобные рассуждения от современных возможностей наблюдения, они иллюстрируют принципиальную возможность эмпири-

[40] См. М. Борн. Эйнштейновская теория относительности. М., «Мир», 1964, стр. 438—439.

ческой проверки утверждения о кривизне пространства, иначе говоря, физическую содержательность этого понятия.

В статье Эйнштейна «Вопросы космологии и общая теория относительности» идея общей положительной кривизны пространства была дополнена представлением о космологической константе, о некоторой постоянной величине, незаметной в межпланетных масштабах, но существенной при космических расстояниях. Иначе не могла быть объяснено равновесие мироздания, не могла быть получена статическая модель Вселенной. Указанную величину — космологическую константу — Эйнштейн ввел в уравнения гравитационного поля. Он прибавил к величинам, определяющим кривизну пространства — времени дополнительные члены — значения метрического тензора, умноженные на космологическую постоянную Λ. Подобное предположение позволило Эйнштейну найти статическое, т. е. независимое от времени, решение уравнений гравитационного поля для замкнутого пространства в предположении ненулевой средней плотности вещества во Вселенной.

Космологическая постоянная в уравнениях Эйнштейна имеет другой смысл, чем постоянная, введенная Нейманом для классического уравнения. Это не модификация квадратичного закона тяготения; космологическая постоянная Эйнштейна означает, что в Космосе действуют иные силы помимо гравитационных. Если космологическая постоянная меньше нуля, это силы притяжения, если больше нуля — силы отталкивания.

Эйнштейн ввел в уравнения *положительную* космологическую постоянную, иначе говоря, предположил существование космических сил отталкивания, уравновешивающих тяготение и обеспечивающих статический, независимый от времени характер Вселенной.

В том же 1917 г., когда появилась статья Эйнштейна «Вопросы космологии и общая теория относительности», де Ситтер нашел решение эйнштейновских уравнений гравитационного поля (также с космологической константой) для Вселенной, в которой нет вещества. Это решение не зависело от времени, пока допускалась пустая Вселенная, а когда учитывались массы, решение переставало быть статическим, возникали как бы отталкивания масс одна от другой и соответственно терялась устойчивость Вселенной. У де Ситтера появилась мысль о нестационарной Вселен-

ной, но эта мысль не реализовалась в какую-либо определенную теорию. Радикальный перелом в развитии релятивистской космологии был связан с фундаментальными открытиями А. А. Фридмана. Но уже работа де Ситтера привела к кризису релятивистской космологии и поискам новой концепции. Этот кризис закончился переходом к нестатической модели. А. А. Фридман показал, что уравнения гравитационного поля могут дать решение для Вселенной с ненулевой средней плотностью материи без космологического члена, если радиус Вселенной возрастает [41].

Эйнштейн сначала не соглашался с выводами Фридмана, но потом присоединился к ним, отказавшись от статической модели Вселенной [42]. В 20-е годы модель Фридмана получила весьма веские эмпирические подтверждения. Еще в 1914 г. Слайфер заметил некоторое смещение в спектрах внегалактических туманностей, причем смещения в сторону красного конца спектра встречались чаще, чем в сторону фиолетового конца. В 20-е годы Хаббл установил для большого числа наблюдаемых туманностей, что свет отдаленных галактик обладает спектральными линиями, смещенными всегда к красному концу спектра, причем величина этого красного смещения зависит от отдаленности туманности, оно оказывается тем значительнее, чем дальше от нас туманность. Очевидно, такое фундаментальное и общее свойство спектров выявляет фундаментальную и общую закономерность в состоянии Вселенной. Смещение спектральных линий можно объяснить как явление Допплера. Если линии сдвигаются к красному концу, т. е. волны становятся длиннее, значит, внегалактические туманности удаляются от нас чем дальше, тем быстрее; Вселенная «разбегается».

Хаббл вывел формулу скорости удаления внегалактических туманностей: $v = hr$, где $r$ — расстояние от наблюдателя, а $h$ — постоянная Хаббла, равная $3 \cdot 10^{-18}$ *сек*$^{-1}$. Затем были получены количественные соотношения, позволяющие определить кривизну пространства в зависимости от скорости разбегания и плотности вещества. Таким образом, от точности спектроскопических наблюдений зависит ответ на вопрос об основном свойстве мира как целого.

Наиболее важные итоги наблюдений Хаббла были опуб-

---

[41] Zs. Phys. Bd. 10, 1922, S. 377.
[42] Zs. Phys. Bd. 11, 1923, S. 326.

ликованы в конце 20-х годов. С тех пор эти итоги были неоднократно проверены новыми наблюдениями. По-видимому, можно считать установленным, что так называемая Местная система галактик, к которой принадлежит и наша галактика, не разбегается. Что же, собственно разбегается? Есть основания, чтобы приписать разбегание Метагалактике: ни звездные системы внутри каждой галактики, ни галактики, входящие в скопления, не отдаляются друг от друга, отдаляются скопления галактик, разбегается Метагалактика, состоящая из таких скоплений. Дальнейшие наблюдения могут дать новые ответы на вопрос, что именно разбегается, причем каждый ответ открывает возможность большого числа различных гипотез. Уравнения гравитационного поля могут согласоваться с моделью однородной, с конечной плотностью вещества, нестационарной Вселенной, не только при ее расширении, но и в случае ее сжатия. Определение будущего Метагалактики зависит от значений средней плотности вещества в ней. Если плотность меньше некоторой критической величины, тяготение не сможет остановить расширение Метагалактики и это расширение будет продолжаться, замедляясь, но не сменяясь сжатием. Если же средняя плотность больше критического значения, тяготение достаточно велико, чтобы расширение сменилось сжатием, красное смещение — фиолетовым и чтобы Метагалактика вернулась к «бесконечно малым» размерам и «бесконечно большой» плотности.

Нестационарная модель Вселенной позволила Эйнштейну отказаться от космологической постоянной в уравнениях гравитационного поля при их применении ко Вселенной в целом. К тому времени, когда появилась работа Фридмана, идея космологической постоянной и сверхгравитационного отталкивания была уже в значительной мере поколеблена. Выводы де Ситтера показали, что космологическая постоянная может фигурировать в уравнениях для Вселенной с нулевой в среднем плотностью вещества и таким образом не связана однозначно с однородной моделью и с постулатом конечной плотности вещества. Они согласуются с «пустой» (т. е. с нулевой средней плотностью вещества) моделью Вселенной, если эта модель нестационарна. Когда расчеты Фридмана и последующие наблюдения Хаббла сделали весьма вероятной нестационарную модель Вселенной, Эйнштейн отказался от идеи

космологической постоянной. Впоследствии, в 1945 г., в дополнении ко второму изданию стаффордовских лекций Эйнштейн писал:

«Если бы хаббловское расширение было открыто во время создания общей теории относительности, космологический член никогда бы не был введен. Его введение в уравнения поля сейчас кажется столь необоснованным потому, что исчезло его единственное оправдание, состоявшее в том, что с его помощью получалось естественное решение космологической проблемы» [43].

Одно время казалось, что космологический член в уравнениях необходим для увеличения сроков существования Вселенной: тяготение само по себе, без дополнительного члена, дает очень быстрые темпы расширения. Мы вынуждены признать, что Вселенная расширялась от отправного состояния до нынешнего в течение меньшего времени, чем время, вычисленное для звезд другими путями, например на основе определения времени радиоактивного распада в метеоритах. В 50-е годы это основание для введения космологического члена в уравнения Эйнштейна пошатнулось. Нынешние расстояния между скоплениями галактик оказались больше, чем это думали раньше, время существования Вселенной соответственно получается больше, и оно согласуется с величинами, вычисленными иным методом. Заметим здесь, что «время существования Вселенной» — условный термин, он вовсе не означает, что Вселенная несколько миллиардов лет тому назад вовсе не существовала, речь идет о длительности современного нестационарного состояния, оно могло следовать во времени за иным состоянием. Об этом последнем сейчас трудно сказать что-либо определенное. Представление об исходной точечной в буквальном смысле Вселенной с бесконечной в столь же буквальном смысле плотностью не вытекает сколько-нибудь однозначно из гипотезы расширения. Достаточно напомнить, что «бесконечно малым» в космологии может считаться элемент однородного космологического субстрата с одним и тем же значением плотности вещества. Но такие совпадающие значения плотности получаются, если брать средние по большим областям, где локальные неоднородности не играют роли. «Бесконечно малый» элемент одно-

[43] А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. М., 1955, стр. 113.

родной Метагалактики может оказаться областью, во много раз превышающей межгалактические просторы, и если вся масса Вселенной сосредоточена в этой области, то и плотность вещества будет лишь условно бесконечной — в том же смысле, в каком беконечно мала указанная область.

## 11. Единая теория поля

Общая теория относительности отождествляет гравитационное поле с искривлением пространства — времени и таким образом позволяет представить движение под действием гравитационных сил как результат геометрических свойств четырехмерного мира. Нельзя ли подобным же образом объяснить все движения тел, иначе говоря, отождествить все поля с изменением геометрических свойств пространства — времени?

Первая попытка такого рода была сделана в 1918 г. Германом Вейлем [44]. Он ввел геометрию, более общую, чем риманова геометрия. В последней в зависимости от кривизны пространства в той или иной мере изменяется *направление* вектора, переносимого из одной точки в другую. В геометрии Вейля изменяется и направление и, сверх того, *длина* переносимого вектора. Коэффициент, указывающий, в какой мере меняется длина вектора в зависимости от свойств пространства, Вейль назвал *метрической кривизной* пространства. Кривизна, о которой до сих пор шла речь, получила при этом название векторной кривизны. Метрическая кривизна риманова пространства равна нулю, а векторная кривизна постоянна. В принципе возможно нериманово пространство (с переменной векторной кривизной) с нулевой метрической кривизной. Геометрия Вейля — еще более общая: в ней и метрическая кривизна, вообще говоря, не равна нулю.

В геометрии Вейля, кроме метрического тензора $g_{\mu\nu}$, определяющего через свои производные векторную кривизну (тензор Римана — Кристоффеля), свойства пространства определяются также масштабным вектором. В четырехмерном многообразии для характеристики геометрических свойств требуется десять компонент симметричного тензора $g_{\mu\nu}$ и четыре компонента масштабного вектора.

---

[44] См. H. Weyl. Raum — Zeit — Materie. Berlin, 1918.

Теория относительности Эйнштейна требует, чтобы законы природы выражались уравнениями, ковариантными при преобразованиях движения. Теория Вейля требует от этих уравнений дополнительной ковариантности — ковариантности относительно масштабных преобразований. Существуют собственные свойства мира, независимые от изменения масштабного вектора,— масштабно-инвариантные. Чтобы представить эти свойства уравнениями, в последние нужно наряду с компонентами $g_{\mu\nu}$ и их производными ввести дополнительные четыре компоненты масштабного вектора.

Вейль предположил, что эти дополнительные компоненты означают электромагнитные потенциалы, подобно тому как $g_{\mu\nu}$ интерпретируются как гравитационные потенциалы. Тогда картина мира рисуется в виде изменения от точки к точке векторной кривизны (тяготение) и метрической кривизны (означающей электромагнитные поля). Векторная кривизна увеличивается, например, вблизи Солнца: здесь она обнаружится изменением направления вектора при обходе контура. Метрическая кривизна возрастает, например, в луче прожектора или возле мощного генератора и обнаруживается в изменении длины вектора при параллельном переносе по замкнутой кривой [45].

Чтобы сделать более явственной трудность геометризации электроматнитного поля, следует повторить некоторые констатации, относящиеся к геометризации гравитационного поля.

Мы рассматриваем закономерности движения материальной частицы. Если эти закономерности можно полностью определить, не ссылаясь на константы, характеризующие саму частицу, и апеллировать только к геометрически представимым свойствам среды, то этим самым закономерности движения частицы принимают вид геометрических закономерностей. На такую возможность геометризации указывает основное свойство гравитационного поля, о котором подробно говорилось в параграфе, посвященном принципу эквивалентности.

Основное свойство гравитационного поля — независимость ускорения материальной частицы от массы — выражается уравнением движения частицы в гравитационном

---

[45] См. А. А. Фридман. Мир как пространство и время, изд. 2-е. М., 1965, стр. 96. Изд. 5. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2009.

поле. В это уравнение входит потенциал гравитационного поля, характеризующий это поле и являющийся функцией пространственных координат и времени, и *не входит* ни масса, ни какая-либо другая постоянная, характеризующая частицу. Именно поэтому тяготение могло быть представлено в качестве *геометрического* свойства пространственно-временно́го мира. От массы частицы не зависит (в линейном приближении) уравнение движения в гравитационном поле. В этом отличие гравитационного поля от электромагнитного. Чтобы дать геометрическое представление тяготения, достаточно было ввести понятие кривизны четырехмерного мира, перейти от эвклидовой или псевдоэвклидовой геометрии мира к более общей, римановой. Но геометризация электромагнитного поля гораздо сложнее, может быть, вовсе невозможна и, во всяком случае, требует более радикального обобщения геометрии. В электрическом поле заряженная частица движется соответственно своему заряду, в уравнение ее движения входит электрический заряд. Величина гравитационного заряда (гравитационной массы) не меняет скорости падения тела, потому что гравитационной массе противостоит равная ей инертная масса. В формуле гравитационного ускорения в числитель входит тяжелая масса, а в знаменатель — инертная, и они сокращаются. Этим гравитационное поле отличается от других полей. Отсюда следует, что движение по инерции и движение под действием силы тяжести отличаются одно от другого только в некоторой определенной системе отсчета.

В ньютоновой механике отличие движения по инерции от движения под действием силы представлялось абсолютным, так как предполагалось, что пространство и время подчиняются эвклидовой геометрии. Разделение движений на движения по инерции и движения под действием сил можно представить как различие между прямыми и кривыми мировыми линиями. Принцип инерции, т. е. первый закон Ньютона, соответственно можно изложить так: существуют прямые мировые линии в эвклидовом мире, они изображают движения тел, не испытывающих действия сил, все остальные движения происходят под действием сил.

Общая теория относительности исключает из такого определения инерционных движений только одно требование — «в эвклидовом мире» — и заменяет его более широ-

ким — «в римановом мире». Тогда прямые превращаются в геодезические линии, и инерционное движение объединяется с движением под действием силы (только силы тяжести!) одним определением: существуют геодезические линии в римановом мире, по которым движутся все тела.

Вейль снимает еще одно требование — «в римановом мире» — и присоединяет к инерционным и гравитационным движениям движения под действием электромагнитного поля. Риманов мир характеризуется отсутствием масштабного вектора, нулевой метрической кривизной. Эти ограничения отпадают в более общей геометрии Вейля. Поэтому в теории Вейля все известные в то время силовые поля объединялись с инерцией: тело, предоставленное самому себе, тело под действием силы тяжести, тело под действием электромагнитного поля — все движутся «по инерции».

Выше, в параграфе, посвященном тяготению (стр. 381), говорилось о четырех формулах, соответствующих четырем законам сохранения, связанным с однородностью пространства и времени. Эти законы выражают ковариантность уравнения гравитационного поля при смещениях во времени и пространстве. В теории Вейля к этим четырем геометрически выраженным закономерностям присоединяется пятая. В геометрии Вейля могут быть представлены не только четыре перехода: «вперед — назад», «вправо — влево», «вверх — вниз» и «позже — раньше», но и пятый переход: «больше — меньше» для единиц измерения, переход, также не влияющий на инвариантный объект. «Невлияние» выражается теперь уже не четырьмя, а пятью тождествами, которым соответствуют пять законов сохранения: кроме четырех, известных нам, еще закон сохранения электрического заряда.

Что же касается действия, то оно и в теории Вейля остается основным четырехмерным физическим инвариантом. Но ему в этой теории соответствует уже не кривизна четырехмерного мира, а более сложное выражение, обладающее инвариантностью при масштабном преобразовании. Это выражение не изменяется в своем числовом значении при переходе от одних единиц к другим, так же как в теории Эйнштейна кривизна мира не изменяется при координатных преобразованиях.

Хочется упомянуть об одном интересном истолковании понятия действия, высказанном в связи с обсуждением тео-

рии Вейля. Оно принадлежит Эддингтону [46]. Если действие измеряется инвариантным числом, числом, не зависимым от единиц измерения, то ни длина, ни площадь, ни объем не могут выражаться таким числом. Абсолютное, не зависящее от единицы измерения число — это, например, число людей в комнате, но никак не площадь комнаты. Но действие — это не число каких-то индивидуумов (например, элементарных частиц), так как оно может быть дробным числом. Есть, однако, и другой пример числа, не зависимого от единицы измерения, причем могущего быть и дробным числом. Это — вероятность, или функция вероятности. Вероятности комбинируются умножением, а действия — сложением. Отсюда представление о действии как о логарифме вероятности. Но так как логарифм вероятности — отрицательное число, то действие представляется логарифмом вероятности данного состояния со знаком минус. Тогда принцип наименьшего действия становится принципом наибольшей вероятности.

Эта мысль Эддингтона могла получить развитие только в связи с развитием квантовой механики.

Теория Вейля дала толчок другим попыткам построения единой теории поля, но не получила какого-либо подтверждения и была впоследствии оставлена. Такая же судьба постигла и другие единые теории поля [47].

Эйнштейн посвятил более тридцати лет разработке единой теории поля. Однако выдвинутая Эйнштейном единая теория поля, как и другие единые теории поля, не дала результатов, которые допускали, хотя бы принципиально, экспериментальную проверку.

---

[46] См. А. Эддингтон. Пространство, время и тяготение. Одесса, 1923, стр. 117. Изд. 3. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2010.

[47] См. П. Бергман. Введение в теорию относительности, ч. III. (теория Вейля и Калуза). ИЛ, 1947, стр. 325—371; А. Эддингтон. Теория относительности. М.— Л., 1934, гл. VII (теория Вейля и Эддингтона), стр. 370—447. Изд. 3. М.: КомКнига/URSS, 2007.

# IX. КВАНТЫ

## 1. Дискретность электромагнитного поля

На заседании Германского физического общества 14 декабря 1900 г. Планк сообщил о выдвинутой им новой теории лучеиспускания, теории, положившей начало развитию современной физики микромира. Новая физика исходит из идеи прерывности процесса излучения и поглощения и существования наименьших количеств излучаемой и поглощаемой энергии. Эти наименьшие количества, кванты энергии, пропорциональны частоте излучения. Коэффициент пропорциональности имеет размерность действия, т. е. энергии, умноженной на время. Это новая мировая константа — наименьшая величина действия, квант действия $6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг · сек*.

Открытие квантов действия было результатом развития теории так называемого теплового излучения. По существу речь шла не только о тепловых лучах, т. е. об электромагнитных волнах большей длины, чем видимый свет, но о всяких электромагнитных лучах: тепловых, видимых и ультрафиолетовых. Однако первоначальные эксперименты, давшие толчок теории, производились с тепловыми лучами.

Упомянем о некоторых понятиях, фигурирующих в теории излучения. Представим себе для этого некоторую полость, стенки которой излучают и поглощают тепловые (или, при более высокой температуре, видимые) лучи. Опыт показывает, что в такой полости рано или поздно наступает равновесие между излучением энергии стенками и ее поглощением. Тогда при постоянной температуре распределение плотности лучистой энергии по частотам приобретает некоторое постоянное значение. Для определенной частоты, вернее для бесконечно малого интервала частот — от $\nu$ до $\nu + d\nu$, плотность энергии можно считать функцией частоты $\nu$. Она называется спектральной плот-

ностью излучения и обозначается через $\rho_\nu$. Основной вопрос теории излучения — это выяснение зависимости спектральной плотности излучения от частоты, т. е. выяснение вида функции $\rho_\nu$. Основной линией развития теории излучения в конце XIX в. были теоретические и экспериментальные поиски кривой, показывающей распределение плотности энергии по участкам спектра.

Кирхгоф доказал, что спектральная плотность излучения $\rho_\nu$ при постоянной температуре не зависит от природы тел, излучающих в полости с идеально отражающими стенками. Он нашел соотношение между испускательной и поглощательной способностью тела и спектральной плотностью $\rho_\nu$. Кирхгоф ввел понятие абсолютно черного тела как тела, поглощающего всю падающую на него энергию. Законы излучения такого абсолютно черного тела и нужно было найти.

В 1893 г. В. Вин сделал в этой области большой шаг вперед. Из термодинамических и электродинамических соображений он вывел закон, согласно которому выражение для $\rho_\nu d\nu$ содержит куб частоты и некоторую функцию одной переменной — отношения частоты к температуре, но макроскопическая термодинамика не давала ответа на вопрос, каков вид этой функции. Необходимо было представить некоторой моделью отдельные микроскопические явления, из которых складывается излучение макроскопических тел. При помощи подобных моделей была найдена кривая распределения энергии, соответствующая экспериментальным данным *для некоторого участка спектра.*

Формула, о которой идет речь, была впервые выведена Релеем, а затем получила более строгое обоснование в работе Джинса. Для больших длин волн эта формула Релея — Джинса дает хорошее согласие с наблюдениями. Но с переходом к более коротким волнам, т. е. с увеличением частоты $\nu$, интегральная плотность излучения в формуле Релея — Джинса стремится к бесконечности. Получается так, как будто излучение неограниченно растет и равновесие между излучением и поглощением энергии не наступает. Между тем опыт показывает, что в случае электромагнитного излучения и поглощения равновесие всегда наступает. Точные эксперименты с излучением абсолютно черного тела показали, что с увеличением частоты функции $\rho_\nu$ не стремится к бесконечности, а проходит через максимум и затем убывает. Для коротких волн (ультра-

фиолетовых) справедлива не формула Релея — Джинса, а другая формула, предложенная в 1896 г. Вином и независимо Б. Б. Голицыным. Она, однако, противоречит наблюдениям в случае длинных волн.

Противоречие было устранено концепцией Планка. Она была сформулирована с помощью представления о гармонических колебаниях элементов излучающего тела. Планк рассматривает каждый излучающий элемент как линейный гармонический осциллятор, т. е. как колебательную систему, в которой масса движется по прямой под действием силы, пропорциональной отклонению массы от положения равновесия и направленной к такому положению. Планк рассматривает излучающие электромагнитные волны стенки полости как множество линейных гармонических осцилляторов. Последние излучают и поглощают волны и таким образом обмениваются энергией с находящимся внутри полости излучением.

Планк предполагает, что энергия, излучаемая осциллятором, всегда является кратной некоторой наименьшей величине — наименьшему количеству энергии $\varepsilon_0$. Иначе говоря, осциллятор может находиться лишь в таких состояниях, когда его энергия принимает значения

$$\varepsilon_0,\ 2\varepsilon_0,\ 3\varepsilon_0,\ \ldots,\ n\varepsilon_0.$$

Состояния с промежуточными значениями энергии невозможны, и осциллятор, излучая или поглощая электромагнитные волны, скачком переходит из одного возможного состояния в другое. Поэтому и поглощение и излучение света (не только тепловых, но и тождественных с ними по своей природе видимых и ультрафиолетовых лучей) происходит таким образом, что излучаемая или поглощаемая энергия кратна наименьшему количеству энергии $\varepsilon_0$, которая, как уже сказано, равна частоте $\nu$, умноженной на $h$ — постоянную Планка, т. е. на $6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг · сек*.

Формула, выведенная для плотности излучения в предположении дискретности энергии, во всех случаях подтверждена экспериментом. Она оправдывается для низких частот или высоких температур (когда справедлива формула Релея — Джинса), для высоких частот или низких температур (когда справедлива формула Вина) и для прочих случаев, когда формулы Релея — Джинса и Вина расходились с экспериментом.

Следующий шаг квантовой физики привел к представлению о дискретности не только излучения и поглощения света, но и самого света, самого электромагнитного поля. По выражению Эйнштейна, тот факт, что пиво продается и покупается пинтовыми порциями, еще не означает, что пиво в бочке состоит из неделимых далее порций величиной в пинту,—последнее предположение должно быть доказано. Подобное доказательство в отношении электромагнитного поля было получено Эйнштейном в работах 1905—1909 гг. Уже первая из них, опубликованная в том же 17-м томе «Annalen der Physik», что и статья «Об электродинамике движущихся тел», содержала представление о квантах электромагнитного поля. В случае бочонка с пивом о наличии неделимых далее объемов и об их величине можно судить по отклонениям от среднего количества пива в сосудах, куда выливается пиво: если все пиво состоит из одной порции, оно попадает в один сосуд и другие останутся пустыми, если же пиво не состоит из дискретных частей, среднее количество пива окажется одним и тем же во всех сосудах.

Таким образом, о дискретных порциях можно судить по величине флюктуации [1].

Эйнштейн исследовал флюктуации плотности излучения в замкнутом объеме. Он воспользовался аналогией с плотностью газа. В резервуаре заключен газ, находящийся в состоянии термодинамического равновесия. Это значит, что средняя плотность газа во всех точках внутри резервуара одинакова; и, взяв два объема в разных точках, мы всегда найдем в обоих одну и ту же плотность газа. Но если брать все меньшие объемы, то будут обнаруживаться случайные колебания числа молекул в этих объемах. При хаотическом движении молекул внутри очень небольшого объема могут оказаться две молекулы, одна молекула, на мгновение вообще не встретится ни одной молекулы. Такие случайные колебания, или флюктуации, связаны с дискретностью вещества. Если бы газ был непрерывным и состоял из бесконечно малых элементов, плотность газа была бы неизменной, какой бы малый объем мы ни брали. Эйнштейн подсчитывает вероятность пребывания $n$ молекул в некотором объеме газа, заключенного в резервуаре. Моле-

[1] См. Ph. Frank. Einstein, his life and times. New York, 1947, p. 72.

кула с достоверностью (вероятностью равной единице) заключена в объеме $V$ всего резервуара. Вероятность найти эту молекулу в меньшем объеме $v$ соответственно меньше:

$$w_1 = \frac{v}{V}.$$

Вероятность $w_n$ найти в объеме $v$ одновременно $n$ отдельных молекул равна произведению $n$ таких вероятностей:

$$w_n = \left(\frac{v}{V}\right)^n.$$

Эйнштейн по аналогии рассматривает вероятность найти всю энергию излучения, содержащегося в некотором резервуаре объемом $V$ с идеально отражающими стенками, в одной его части объемом $v$. Вся энергия излучения с частотой $\nu$ равна произведению спектральной плотности $\rho_\nu$ в интервале частот $d\nu$ на этот интервал и на объем $V$ резервуара, в котором происходит излучение: $E = V\rho_\nu\, d\nu$.

Вероятность сосредоточения всей этой энергии в объеме $v$ оказалась равной

$$w = \left(\frac{v}{V}\right)^{\frac{E}{h\nu}},$$

где $h$ — постоянная Планка. Аналогия с вероятностью встретить $n$ молекул газа в объеме $v$ будет полной, если представить излучение состоящим из $n$ частиц, энергия каждой из которых равна $h\nu$. Тогда число молекул $n$ соответствует числу частиц излучения, стоящему в качестве показателя степени в формуле вероятности

$$n = \frac{E}{h\nu}.$$

Теперь рассмотрим флюктуации — мгновенные отклонения $\varepsilon$ энергии излучения в малых объемах $E$ от ее среднего значения $\overline{E}$

$$\varepsilon = E - \overline{E}.$$

В среднем $\varepsilon$ уничтожаются, так как принимают то положительные, то отрицательные значения. Если взять среднее значение квадратов $\varepsilon$, то оно уже не равно нулю (квадраты всегда положительны) и оказывается равным

$$\overline{\varepsilon^2} = h\nu\overline{E}.$$

Но такая квадратичная флюктуация, как показал Эйнштейн, может иметь место лишь при дискретности излучения. Если же оно представляет собой непрерывную среду, заполняющую объем $V$, получается иная формула флюктуаций. В этом случае флюктуации имеют совсем иную природу, это уже не случайные колебания числа частиц в объеме, а интерференция волн, распространяющихся во всех направлениях. Интерференционные максимумы и минимумы энергии не обладают устойчивостью. Такой картине соответствует определенное математическое выражение, описывающее среднюю квадратичную флюктуацию энергии.

Эйнштейн вывел первое выражение флюктуации, исходя из формулы Голицына — Вина, т. е. формулы, экспериментально подтвержденной для сравнительно больших частот. В этом случае картина оказалась соответствующей дискретной природе излучения. Второе выражение для флюктуации, соответствующее непрерывности излучения, было получено Эйнштейном из формулы Релея — Джинса, справедливой при сравнительно небольших частотах. Значит, при коротких волнах существенна дискретность излучения, а при длинных — его непрерывность.

Если же в основу вычисления флюктуаций положить формулу Планка, справедливую во всех случаях, то выражение для флюктуации состоит из двух членов, один из которых описывает флюктуации дискретных частиц излучения, а второй — случайные флюктуации волн в непрерывной среде.

В этой теории речь по существу идет не только о дискретности излучения, но и о существовании дискретных частиц света. При помощи этих частиц — квантов света, или фотонов,— Эйнштейн объяснил закономерности фотоэлектрического эффекта, явления, при котором свет вырывает электроны с поверхности металла и энергия света, т. е. электромагнитных колебаний, переходит в кинетическую энергию электронов.

С точки зрения волновой теории объяснение фотоэффекта могло быть следующим. Свет вызывает вынужденные колебания электрона и при резонансе между периодом собственных колебаний электрона и периодом световой волны электрон в конце концов может покинуть поверхность металла. С такой точки зрения энергия движущегося, покинувшего металл электрона пропорциональна

интенсивности света. Но в действительности энергия электронов, сорванных светом с поверхности металла, вовсе не зависит от интенсивности света. От последней зависит лишь число электронов, вылетевших из металла. Скорость же их и, следовательно, энергия находятся в линейной зависимости от частоты света.

Эйнштейн показал, что такие экспериментально обнаруженные зависимости могут быть объяснены, если оставить классическую волновую теорию света и предположить, что свет — это поток отдельных частиц, фотонов. Каждый фотон, поглощаемый металлом, отдает свою энергию электрону. При достаточно большой энергии электрон преодолевает удерживающие его связи и покидает поверхность металла. Поэтому энергия электрона зависит от энергии фотона (равной произведению частоты на постоянную Планка) и, следовательно, находится в линейной зависимости от частоты света. Число же фотоэлектронов пропорционально числу поглощаемых фотонов, т. е. интенсивности освещения, хотя и не равно ему, так как не каждый фотон срывает электрон с поверхности металла.

Идея дискретности проникла, таким образом, в учение о свете, в электродинамику и оптику. Речь шла уже не только о квантовании процессов излучения и поглощения света, но также о квантовании световой энергии в пространстве. Казалось, континуальная физика отступила под натиском атомистических идей. На самом деле развитие науки пошло совсем иным путем — к синтезу атомистических и континуальных представлений, к новым взглядам на частицы и волны, не находящим в классической физике сколько-нибудь полных аналогий. В сущности, уже теория световых квантов Эйнштейна содержала коллизию «волны — частицы», столь характерную для физики XX столетия. Корпускулярное представление о свете объясняло явления фотоэффекта, но для других оптических явлений сохранялось волновое объяснение.

Таким образом, физика в целом на вопрос, «что такое свет», отвечала: не «волны» и не «корпускулы», а «и волны и корпускулы», причем смысл этих понятий уже неполностью совпадал со смыслом, содержавшимся в вопросе.

Только что было сказано об этой коллизии как о характерной особенности физики XX столетия. Наше столетие началось в физике, собственно говоря, в 90-е годы прошло-

го столетия, приблизительно в 1895 г. Открытие электрона возвестило начало нового периода не только потому, что электронная теория, развиваясь, привела к релятивистской механике. Электрон был первой, ставшей известной людям *элементарной частицей*. Элементарные частицы как раз и отличаются неотделимостью волновых и корпускулярных свойств. Вторая, ставшая известной элементарная частица, фотон, обладает корпускулярными свойствами в явлениях фотоэффекта и волновыми — в явлениях дифракции и интерференции. Что же касается электрона, то первоначально были известны его корпускулярные свойства, а волновые были обнаружены только на исходе первой четверти нашего столетия. Однако уже в 1913 г. Нильс Бор описал некоторые парадоксальные с точки зрения классической физики особенности поведения электронов в атомах. Десять лет спустя указанные особенности были объяснены волновыми свойствами электрона.

## 2. Модель атома

Специальная теория относительности включила оптические константы и понятия в механику макромира. Теория Бора включила их в механику атома.

В чем заключалась основная проблема атомной механики? Она состояла в поисках закона, которому подчиняется движение электронов вокруг положительного ядра. Это движение непосредственно следовало из представления о положительном центральном заряде и окружающих его электронах. Притяжение, неизбежно возникающее между протоном и электроном, могло быть уравновешено лишь центробежной силой электрона, обращающегося вокруг ядра, подобно планете в солнечной системе. Такую картину строения атома создал Резерфорд. С другой стороны, классическая теория излучения выводила из движений электронов в атоме возникновение электромагнитных колебаний. Колебания электронов как электрических зарядов должны были неизбежно вызывать электромагнитные волны той же частоты. Поэтому излучение атома можно было представить как результат обращения электронов по орбитам вокруг ядра. Именно такое представление вытекало из классической электродинамики Максвелла — Лоренца. Однако оно не могло быть согласовано с выводами из спектроскопических наблюдений. С течением времени экспери-

ментальные работы и обсуждение их результатов подготовили отказ от посылок классической электродинамики в картине излучения атома. Вместе с тем подготовлялось коренное изменение принципов механики атома и новое представление о движении электронов в атоме. Развитие первоначальных представлений о строении атома и движении электронов, изучение спектров и, с другой стороны, представление о квантах легли в основу теории Бора.

Бор ввел квантовые понятия в картину атома и объяснил эмпирически найденные данные о спектрах. Он применил идею квантования к механической системе — атому, состоящему из ядра и планетарных электронов. Постулаты теории Бора прежде всего объясняют устойчивость атомов. Классическая механика и электродинамика не могли объяснить устойчивость атома, каким он представлялся физикам после Резерфорда. Электроны движутся по круговым или эллиптическим орбитам, т. е. с ускорением. Такое движение, согласно классическим законам Максвелла и Лоренца, приводит к излучению электромагнитных волн; электрон в результате излучения должен терять энергию, двигаясь по все более близким к ядру орбитам, и в конце концов упасть на ядро. Далее, классическая электродинамика не могла объяснить дискретность спектра излучения атомов. Если бы непрерывное излучение уменьшало энергию электрона и сокращало его орбиту, соответственно менялась бы частота. Тогда атомы, в различной степени потерявшие энергию вследствие излучения, испускали бы спектральные линии, соответствующие всевозможным частотам, и давали бы непрерывный спектр, а не дискретные резкие линии.

Мысль Бора о дискретных стационарных значениях энергии атома была сформулирована в виде двух постулатов: 1) существуют стационарные состояния атома, энергия $E$ которых может принимать лишь дискретные значения $E_1$, $E_2$, $E_3$..., причем переходы из одного стационарного состояния в другое происходят скачками, и 2) при этом излучаются кванты электромагнитного поля с определенными частотами, связанными не с частотами периодических движений электрона, а с разностью энергий уровней $E_m$ и $E_n$:

$$h\gamma = E_m - E_n.$$

Это соотношение называется *условием частот* Бора.

Теория Бора достигла крупных успехов, она позволила объединить результаты спектроскопических наблюдений в стройную систему. Но она потерпела поражение уже при попытке перейти от водородоподобного атома к нейтральному атому гелия, т. е. к системе с двумя электронами, движущимися вокруг ядра. И тогда вспомнили о компромиссной природе боровской теории.

История эта поучительна для современной теоретической физики, именно для квантовой электродинамики, достигшей существенных успехов в объяснении новых экспериментальных данных при помощи допущений, не выводимых пока из более общих принципов. Можно думать, что наметившиеся затруднения приведут современную квантовую теорию к еще более радикальным неклассическим идеям, так же как затруднения теории Бора привели физику первой четверти века к переходу от компромиссной теории атома к гораздо более радикальной квантовой механике 20-х годов.

Прежде чем перейти непосредственно к квантовой механике, нужно указать на одну важную для последней сторону теории Бора. Речь идет о *принципе соответствия*.

Этот принцип был высказан Бором в связи с конкретной проблемой описания движения электронов на отдаленных от ядра орбитах, т. е. описания состояний атома, характеризующихся большими квантовыми числами $n$. Чем больше квантовое число $n$, тем ближе друг к другу соседние стационарные состояния и тем ближе квантовое условие частот к классическому представлению о зависимости частоты излучения от частоты обращения электрона в атоме. Из классической электродинамики следует, что частота излучаемого света кратна частоте обращения электрона. Обозначая через $\omega$ частоту обращения электрона, можно представить спектр излучаемых частот $\nu$, каким его рисует классическая электродинамика:

$$\nu = n\omega,$$

где $n$ — целые числа. Напротив, в теории Бора частота $\nu$ определяется двумя стационарными состояниями $n$ и $m$. Если числа $n$ и $m$ велики по сравнению с $n-m$ (также целое число), то при переходе из $n$-состояния в $m$-состояние излучаемая частота будет приближенно равна

$$\nu \approx (n - m)\,\omega,$$

т. е. будет кратной ω. Следовательно, при больших квантовых числах квантовое условие частот приближается к классическому соотношению между частотой излучения и частотой обращения электрона. Обобщая этот результат, Бор рассматривает классические закономерности как предельный случай квантовых закономерностей.

### 3. Волны де Бройля

Летом 1923 г. Луи де Бройль, готовясь к защите докторской диссертации, посвященной обоснованию квантовых условий Бора, решил изложить свои исходные идеи в небольшой статье. Статья эта появилась в докладах Парижской Академии наук в начале осени. В ней было высказано в самой предварительной форме новое представление о связи между волновыми процессами в непрерывной среде, с одной стороны, и движением дискретных частиц — с другой. В ноябре де Бройль защитил диссертацию. Она была опубликована в следующем, 1924 г.[2] и положила начало новому периоду в развитии квантовой физики.

Согласно де Бройлю, частица обладает волновыми свойствами, ее движению со скоростью $v$ соответствует распространение волны со скоростью

$$u = \frac{c^2}{v}.$$

Нам известно, что механическая скорость $v$ всегда меньше скорости света $c$. Поэтому $u$ всегда больше скорости света, что не противоречит принципу относительности: принцип относительности ограничивает скорости переноса энергии и массы, которые только и могут служить сигналами. О порядке величины скорости волн де Бройля, «волн материи», можно составить представление из простых примеров. Если пешеход передвигается со скоростью 3—5 *км/час*, то волны де Бройля несутся с колоссальной скоростью, примерно равной $4 \cdot 10^{17}$ *м/сек*. Движению поезда (его скорость в десять раз больше скорости пешехода) соответствует сравнительно медленное распространение волн де Бройля, которые движутся все же в несколько сот биллионов раз быстрее, чем поезд. Каким же образом эти гигантские скорости волн, во много раз превышающие

[2] См. Ann. de Phys., v. 10, 1925, p. 22.

скорости света, могут быть связаны с гораздо меньшими механическими скоростями? Де Бройль объяснил это при помощи понятия групповой скорости волн.

Если в одной и той же среде одновременно происходят колебания различной частоты, иными словами, через каждую точку проходят волны различной длины, то амплитуды результирующих колебаний в некоторых точках могут быть очень велики. Там, где колебания будут совпадать или почти совпадать по фазе, расположатся центры групп волн. Можно доказать, что такие центры будут двигаться со сравнительно небольшой скоростью. Де Бройль отождествил скорость движения частицы $v$ со скоростью движения центра группы волн. Частица в этой теории рассматривается как «волновой пакет» — нечто вроде пункта, где интерференция волн создает особенно энергичное колебание. Такой волновой пакет движется со скоростью $v$.

Чтобы подробнее и точнее изложить теорию де Бройля, нужно напомнить читателю некоторые понятия и формулы, относящиеся к распространению волн. Как известно, волновой процесс, когда отклонение колеблющейся величины $S$ (координата, напряженность поля, вероятность какого-либо события и т. п.) от положения, около которого она колеблется, является простой периодической функцией времени, описывается выражением

$$S = A \sin (2\pi\nu t + \varphi_0).$$

Здесь $A$ — амплитуда, $\nu$ — частота колебания, $\varphi_0$ — начальная фаза. Все выражение в скобках называется фазой колебаний. Периодом колебания $T$ называется время, через которое повторяются значения $S$, так что $T = 1/\nu$.

Фаза колебания в некоторой точке, находящейся на расстоянии $x$ от источника колебаний, может быть представлена формулой

$$\varphi = 2\pi\nu\left(t - \frac{x}{u}\right),$$

где $u$ — скорость, с которой поверхность постоянной фазы удаляется от источника, т. е. фазовая скорость.

Здесь мы предположили, что начало отсчета времени выбрано так, что $t = 0$, когда $S = 0$. В противном случае приходится ввести в формулу начальную фазу колебания. Тогда фаза $\varphi$ выразится формулой

$$\varphi = 2\pi\nu\left(t - \frac{x}{u}\right) + \varphi_0.$$

Кроме понятий амплитуды, фазы, фазовой скорости, частоты, периода и длины волн нам понадобится впоследствии еще одно понятие. Это волновой вектор **k**. По направлению он совпадает с положительной нормалью к поверхности равной фазы. Абсолютная величина волнового вектора — обратная величина длины волны — число волн на единицу длины, т. е. волновое число, о котором уже говорилось:

$$|\mathbf{k}| = \frac{1}{\lambda}.$$

До сих пор речь шла о правильных синусоидальных колебаниях. Однако реальные периодические колебания не носят столь правильного характера. Более того, периодические колебания, строго говоря, вообще не осуществляются в природе. Периодичность в строгом смысле означает, что как бы ни увеличивалось время $t$, периодическая функция $f(t)$ через равные промежутки времени, периоды $T$, принимает одни и те же значения, и это остается справедливым при любом числе периодов. Но реальные периодические колебания не бесконечны, они в то или иное время возникают и прекращаются. Они ограниченны и в пространстве: волновые процессы где-то начинаются и где-то заканчиваются. С этим затруднением математика справляется просто: она изображает волновой процесс бесконечной синусоидой. В случае отступления от синусоидальной формы функция, описывающая периодический процесс, может быть разложена по синусоидальным составляющим. *Иначе говоря, когда некоторая периодическая функция* изменяется негармонически, то ее, согласно теореме Фурье, можно представить в виде разложения по гармоническим функциям — в виде ряда Фурье — с различными частотами, кратными частоте разлагаемого негармонического колебания: $\nu$, $2\nu$, $3\nu$, ...

Когда речь идет об электромагнитных колебаниях, то составляющие колебания с кратными частотами дадут дискретный спектр с идеально тонкими линиями, каждая из которых соответствует только одной частоте (если бы частоты, соответствующие линии, несколько отличались друг от друга, линия была бы размазанной, она охватывала бы конечный участок спектра).

Оптические наименования можно применить в отношении и других функций и во всех случаях называть разложение функции в ряд Фурье *разложением в спектр* или

спектральным разложением. Можно применить и акустическую терминологию и назвать гармоническое колебание с наинизшей частотой основным тоном, а составляющие — обертонами.

Коэффициенты, фигурирующие в разложении,— так называемые коэффициенты Фурье — представляют собой амплитуды обертонов. Амплитуды могут быть и положительными и отрицательными. Интенсивности, напротив, могут *быть только положительными*: они измеряются квадратами амплитуд.

Все эти понятия можно обобщить и таким образом сохранить для случая непериодических колебаний. Ряд Фурье заменяется при этом интегралом Фурье — интегралом по частоте. Здесь уже нельзя говорить о разложении в *дискретный* спектр. Частоты изменяются непрерывно, и функция здесь разлагается в *непрерывный* спектр.

*Этих сведений об изображении* волновых процессов нам достаточно, чтобы в дальнейшем меньше загружать отступлениями изложение работ де Бройля, Шредингера и Гейзенберга.

Де Бройль, решая проблему, поставленную на десять лет раньше Бором, опирался на специальную теорию относительности, появившуюся за двадцать лет до этого, и широко применял и развивал мысли Гамильтона, имевшие уже столетнюю давность. Но де Бройль шел и дальше в ретроспективном анализе и обобщении старых физических теорий, он восходил к основным идеям оптики и механики XVII—XVIII вв.

В истории физики новейшего времени, да и предыдущего периода, анализ старых теорий, их интерпретация и обобщение подчас настолько тесно связаны с новыми идеями, что глубина исторических экскурсов, интерес к прошлому науки, величина *исторического интервала*, *анализируемого* мыслителем, иногда становятся признаком и мерой оригинальности и широты новых идей. Неслучайно Эйнштейн повесил в своем рабочем кабинете портреты Фарадея и Максвелла. Де Бройль имел основания сделать то же самое в отношении Ферма, Мопертюи и Гамильтона.

В своей диссертации де Бройль исходил из аналогии между двумя широкими обобщениями классической физики: принципом кратчайшего времени *распространения* света и принципом наименьшего интеграла механической скорости при движении материальной точки. Этот ход

мысли представляет первостепенный исторический интерес. Оба принципа — вариационные. Тот факт, что де Бройль исходил из этих принципов, показывает не только историческую связь между классической и новой физикой, но и особую роль вариационных принципов в переходе старой физики в новую и их особое место в классической физике, рассматриваемой ретроспективно.

В главе, посвященной аналитической механике и принципу наименьшего действия, говорилось, что законы геометрической оптики можно вывести из требования наименьшего времени, т. е. из сформулированного в XVII в. принципа Ферма. Если перед нами среда, где скорость света меняется непрерывно, мы берем интеграл от обратной величины фазовой скорости $u$ по пути распространения света. Этот интеграл при действительном распространении света будет наименьшим.

В принципе, выдвинутом Мопертюи, механическая скорость $v$ играет ту же роль, что обратная величина волновой скорости в руководящем принципе оптики — принципе Ферма. Принцип Мопертюи можно получить из принципа Ферма, если предположить, что $v$ пропорционально $1/u$, что механическая скорость есть проявление какого-то волнового процесса с фазовой скоростью $u$ и эти величины, $v$ и $u$, связаны постоянным коэффициентом пропорциональности. Можно продолжить аналогию между распространением света и движением частицы. До сих пор речь шла о луче, с одной стороны, и траектории частицы — с другой. Но луч — это нормаль к сферической поверхности равной фазы волны. Соответственно в механике можно рассматривать вектор количества движения **p** как нормаль к *поверхности равного действия* $W$. Можно выразить принцип наименьшего действия в волновой форме. Представим себе волнообразное распространение действия, иначе говоря, представим действие как фазу некоторой волны, распространяющейся из источника во все стороны. Но фаза — безразмерная величина. Поэтому в механике фазе соответствует отношение действия $W$ к некоторой константе $h$, имеющей размерность действия.

Скорость распространения «волн действия», т. е. скорость движения поверхности равного действия (аналогичной поверхности равной фазы в оптике), равна

$$u = \frac{E}{p} = \frac{E}{mv},$$

где $E$ — энергия движущейся частицы, а $p$ — абсолютная величина импульса. Эта скорость, очевидно, обратно пропорциональна скорости частицы $v$.

Напомним, что фазовую скорость $u$ волны можно выразить через абсолютную величину $k$ волнового вектора $\mathbf{k}$ и частоту $\nu$:

$$u = \frac{\nu}{k}.$$

В механике этой скорости соответствует фазовая скорость «волн действия»:

$$u = \frac{E}{p}.$$

Теперь сопоставим *групповую скорость* в оптике и скорость частицы в механике. Обе эти величины получаются дифференцированием только что написанных. Групповая скорость световых волн равна

$$\frac{\partial \nu}{\partial k};$$

а скорость частицы получается дифференцированием фазовой скорости «волны действия»:

$$\frac{\partial E}{\partial p}.$$

Таким образом, можно перейти от оптики к механике, заменив частоту $\nu$ энергией $E$, а волновой вектор $\mathbf{k}$ — импульсом $\mathbf{p}$. Энергия и импульс принадлежат частице, частота и волновой вектор — волне. Их связывает друг с другом коэффициент $h$, имеющий размерность действия:

$$\nu = \frac{E}{h}, \quad \mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{h}.$$

Высшим взлетом обобщающей мысли де Бройля было предположение, что этот коэффициент совпадает с постоянной Планка — квантом действия. Тогда энергия частицы выражается через частоту, а импульс — через волновой вектор:

$$E = h\nu, \quad \mathbf{p} = h\mathbf{k}.$$

Отсюда выводится выражение для длины $\lambda$ де-бройлевых волн. Абсолютная величина волнового вектора

обратна длине волны; поэтому, подставляя $1/\lambda$ в выражение для импульса вместо $k$, получаем $p = h/\lambda$, откуда

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mc}.$$

Для вычисления частоты $\nu$ нужно воспользоваться релятивистским выражением энергии $E = mc^2$

$$\nu = \frac{mc^2}{h}.$$

Применение релятивистского соотношения между энергией и массой — одна из самых важных с исторической точки зрения идей де Бройля. Его теория оказывается в известном смысле обобщением релятивизма и квантовой теории. В самом деле, де Бройль связывает два основных определения энергии: релятивистское $E = mc^2$ и квантовое $E = h\nu$.

Таковы основные утверждения теории де Бройля. Они позволили преодолеть наиболее серьезную в то время трудность в развитии квантовой физики — вывести квантование орбит электрона из более общего принципа и тем самым освободиться от произвольного выбора «разрешенных» орбит. В 20-е годы квантовая теория в своем развитии подошла к такому этапу, когда физическое истолкование квантовых условий Бора для электронных орбит стало очередным требованием физики и отсутствие такого истолкования перестало перекрываться успехами модели Бора. Можно назвать немало аналогичных исторических моментов, в которые затруднения теории при объяснении более широкого круга явлений заставляют вспомнить о ее общих основах. По-видимому, к такому моменту подходит современная квантовая электродинамика.

В начале 20-х годов тенденция к объединению оптики (т. е. электродинамики) с механикой имела в своем активе ряд крупнейших открытий — теорию относительности, теорию квантов действия, теорию фотонов, боровскую модель атома. Затруднения последней, казалось, могли быть решены еще более радикальным включением оптических (электродинамических) констант и понятий в механику, именно в механику атома.

Де Бройль рассматривает механику электронов (а тем самым и механику вообще) с точки зрения оптико-механической аналогии. Геометрическая оптика справедлива,

пока мы не должны принимать во внимание конечную длину световых волн, строгой она является лишь для бесконечно малых длин волн.

Может быть, и классическая механика строго справедлива лишь при бесконечно малых длинах «волн материи»? Может быть, отступления от классических законов, открытые Бором внутри атома, можно объяснить, приняв во внимание волновые поправки к классическому представлению движения?

Де Бройль рассматривает периодическое движение по замкнутой орбите (т. е. именно тот случай, который встречается в боровской модели атома) и приходит к выводу, что если частица движется по круговой орбите с постоянной скоростью, то возможны лишь такие орбиты, на которых длина волны укладывается целое число раз. Отсюда, по мнению де Бройля, можно вывести боровское квантование орбит водородоподобного атома.

Если квантование выражает волновую природу движения частицы, то, быть может, классическая механика в целом, подобно геометрической оптике, есть лишь предельный случай волновой механики, строго справедливый только для бесконечно малых длин де-бройлевых волн. Что касается геометрической оптики, то ее границы демонстрируются интерференцией и дифракцией света. Может быть, и движение частиц обнаруживает аналогичные свойства, когда длина де-бройлевых волн становится существенной?

Эксперимент ответил утвердительно на этот вопрос, и это было важнейшим событием в истории квантовой механики. Как бы много ни давала науке каждая новая ступень теоретического исследования, какие бы новые стороны и соотношения фактов ни раскрывали все более совершенные, мощные и изящные методы математической разработки физических проблем, все же действительно новый период в развитии физики всегда связан с новыми экспериментальными наблюдениями. Более того, каждая новая физическая теория, преобразующая картину мира, доказывает свою нетривиальность и силу, когда она предвидит явления, которые можно обнаружить решающими экспериментами. В предыдущей главе мы вспоминали очень глубокую эпистемологическую идею Эйнштейна: выбор научной теории, не вытекающий из непосредственных результатов опыта, связан с сознательным или интуитивным

предвосхищением принципиальной возможности эксперимента, придающего физический смысл вводимым понятиям. Возможность experimentum crucis — важнейший критерий исторической подготовленности теории. Экспериментально разрешимые задачи складываются в непрерывный исторический путь научного прогресса. Теория тяготения Ньютона без астрономических открытий XVIII в., периодический закон без открытия галлия, скандия и германия, теория относительности без результатов экспедиций 1919 г. не проиграли бы в своей логической стройности, но историческая роль их была бы иной. Для истории волновой и квантовой механики первостепенное значение имеют эксперименты 1925—1927 гг., показавшие наличие дифракционных явлений при движении электронов.

Вскоре после опубликования работы де Бройля Эйнштейн высказал мысль о неизбежности дифракционных явлений при движениях электронов, явлений, которые можно обнаружить в случае медленных движений [3]. Теория де Бройля связывает длину волн материи со скоростью механического движения частиц. Длина волны равна постоянной Планка, деленной на импульс частицы:

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Если речь идет об электроне, то при достаточно малой его скорости $v$ длина волны $\lambda$ принимает значения, допускающие экспериментальное обнаружение дифракции. То же относится к протонам. Поэтому, указывал Эйнштейн, при очень низких температурах, когда длина де-бройлевых волн становится одного порядка с диаметром молекулы, можно ожидать аномалий дифракционной природы. Такие аномалии уже наблюдались не раз. Всего за год до работы Эйнштейна Гюнтер наблюдал неожиданное ускоряющееся падение вязкости водорода при достижении определенной области низких температур [4]. Эйнштейн предложил объяснить подобные отклонения, характерные для низких температур, дифракцией де-бройлевых волн. Вскоре Эльзассер [5] отметил, что дифракционные явления должны наблюдаться и при столкновениях свободных электронов с атомами. И здесь уже имелись наблюдения,

[3] См. Sitzungber. Berl. Akad. Wiss., Bd 9, 1925.
[4] См. Zs. Phys. Chemie, Bd 110, 1924, S. 626.
[5] См. Naturwiss., Bd 13, 1925, S. 711.

ожидавшие объяснения, в частности значительное увеличение свободного пробега медленных электронов при прохождении через благородные газы.

Специальные опыты были поставлены в 1927 г. Дэвиссоном и Джермером[6]. В указанных опытах Дэвиссон и Джермер направляли узкий пучок электронов на монокристалл никеля и при этом определяли число электронов, рассеянных под разными углами. Число это давало в некоторых направлениях резко выраженные максимумы. Картина напоминала рассеяние кристаллом рентгеновых лучей. Если бы на кристалл падали лучи определенной длины волны, картина оказалась бы той же, какую наблюдали Дэвиссон и Джермер (если учесть также эффект преломления волн де Бройля). По распределению максимумов рассеянных электронов можно было определить длину волн, которые вызвали бы благодаря дифракции аналогичную картину. Такая длина волны в согласии с теорией де Бройля оказалась равной $h/mv$.

В 1928 г. Г.-П. Томсон[7] произвел опыты с прохождением электронов через фольгу. Он пользовался сравнительно быстрыми электронами (20—30 тыс. *эв*), которым соответствовала длина де-бройлевых волн порядка 10 *см*. Пройдя сквозь фольгу, электроны попадали на фотографическую пластинку. На ней появились дифракционные круги, как при прохождении через фольгу рентгеновых лучей. По размерам кругов была вычислена длина де-бройлевых волн, оказавшаяся в согласии с теорией. Такие же опыты производил П. С. Тартаковский[8]. В 1927—1928 гг. и позже было сделано немало аналогичных опытов. Все они подтвердили теорию де Бройля.

## 4. Уравнение Шредингера

Теория де Бройля открыла серию широких и смелых обобщений в области физики, следовавших друг за другом с частотой, которая раньше представлялась бы немыслимой.

Каждый год, вернее каждые несколько месяцев, появлялась идея, казавшаяся рубежом двух эпох в истории

[6] См. Phys. Rev., v. 30, 1927, p. 705.
[7] См. Proc. Roy. Soc., v. 117, 1928, p. 660.
[8] См. П. С. Тартаковский. Экспериментальные основания волновой теории материи. М.— Л., ГТТИ, 1932.

науки: старой, охватывающей всю предшествующую физику, и новой. Вскоре эта идея оказывалась подходом к еще более радикальной идее. Темп прогресса становился все более стремительным, а самый характер новых теорий — все более радикальным в смысле отказа от классических идей. Даже генезис теории относительности не был таким концентрированным во времени: после специальной теории относительности прошло десять лет до более радикального ее обобщения. В 30-е годы последовали очень крупные экспериментальные открытия в области атомного ядра и элементарных частиц и широкая разработка квантовой и релятивистской квантовой механики. Но в общих принципах физической теории таких радикальных переворотов, как в 1925—1927 гг., уже не происходило. Сравнительно органическое развитие теории во второй четверти столетия, по-видимому, сменится новым критическим периодом — об этом говорит ряд симптомов, о которых речь впереди.

Наиболее быстрое развитие теории началось почти через год после опубликования диссертации де Бройля, когда Гейзенберг и Шредингер выступали с новыми концепциями.

Статья Гейзенберга[9] была опубликована в конце 1925 г., а статьи Шредингера[10] — в начале 1926 г. Но теория Шредингера ближе к идеям де Бройля, она служит непосредственным логическим продолжением этих идей.

Только что было сказано о характерной черте развития теоретической физики в 1924—1927 гг. Каждая из последовательно появлявшихся концепций была настолько революционной, что и сейчас может претендовать на роль начального звена квантовой механики. Теория де Бройля ввела в науку коллизию волнового и корпускулярного представления материи как универсальную идею физической картины мира. Гейзенберг, Борн и Иордан открыли такую фундаментальную особенность квантовой механики, как применение матриц, с которыми квантовая механика получила специфический математический аппарат. Операторное исчисление, теория преобразования Иордана — Дирака и принцип неопределенности могут оспаривать друг

---

[9] См. Zs. Phys., Bd 33, 1925, S. 879.

[10] См. Ann. Phys., Bd 79, 1926, S. 361, 489; Bd 80, 1926, S. 437; Bd 81, 1926, S. 109.

у друга титул начального открытия, от которого ведет свое летоисчисление квантовая механика.

С известной точки зрения и теория Шредингера может считаться началом новой механики микромира. Она содержит основное уравнение такой механики. Историческая роль этого уравнения станет яснее, если вспомнить об основных уравнениях движения, найденных классической физикой.

При помощи этих уравнений можно получить координаты системы, т. е. положение в пространстве всех входящих в систему частиц, и импульсы, одним словом, состояние системы в любой момент времени $t$, если мы знаем состояние системы для $t = 0$. В этом и состоит классическое механическое понимание детерминизма: состояние механической системы в один момент полностью определяет ее состояние в каждый последующий момент. Если считать природу в целом большой механической системой, а именно так думали в XVII—XVIII вв., то на сцену появляется высшее существо Лапласа, знающее координаты и скорости всех частиц Вселенной и способное предсказать любые события, в том числе историю людей. В XIX в., если иметь в виду передовых мыслителей того времени, природу уже не считали механической системой, и образ, витавший в сознании Лапласа, уже не соответствовал научной картине мира, включавшей сложные формы движения, не сводимые к изменению пространственных координат частиц вещества.

Но никто в XIX в. и в первой четверти XX в. не сомневался, что для механических систем состояние системы в момент $t = 0$ с абсолютной точностью предопределяет состояние системы в любой другой момент $t$. Никто не сомневался при этом, что состояние системы представляется вполне определенным в каждый момент по всем характеризующим его величинам.

Основной образ классической механики — это частица, движущаяся относительно некоторого тела отсчета, т. е. изменяющая свои координаты в системе, связанной с телом отсчета, в той или иной линейной (инерционное движение) или нелинейной (ускорение, движение в силовом поле) зависимости от времени. Этот образ, явный или неявный,— логический исток кинетических, динамических и атомистических идей XVII—XIX вв. и всей классической картины мира. Наука XVII—XVIII вв. стремилась

свести картину мира к одноцветному, механическому представлению движущихся частиц; в XIX в. картина мира стала многокрасочной, наука узнала о несводимости сложных форм движения к более простым. Но если спросить, к какому именно механическому представлению не сводилась классическая картина мира (а вопрос этот, несмотря на внешнюю парадоксальность и близость к анекдотическому «без какого варенья хотите Вы чаю?», вполне законен), то таким представлением будет изменение определенных в каждый момент координат частицы в зависимости от времени. Классическая картина мира не сводилась к нему, но была неотделима от него.

В новой картине мира представление о координатах материальной точки, определенных в каждый момент и определенным образом изменяющихся во времени, уже не является без существенных оговорок наиболее общим представлением. В квантовой механике состояние системы описывается волновой функцией, с помощью которой определяется *вероятность* того или иного состояния системы.

Уравнение, найденное Шредингером в 1925 г., имело прообраз — волновое уравнение классической физики. В классическом волновом уравнении величина $\psi$ — функция координат и времени. Но волновое уравнение никогда раньше не рассматривали в качестве уравнения движения частицы и никогда не думали заданием волновой функции описывать состояние системы частиц. Это сделал Шредингер.

Теория Шредингера и теория де Бройля близки друг к другу по логической структуре. В обоих случаях имел место синтез самых широких обобщений классической механики (принцип наименьшего действия), с одной стороны, и волновой оптики — с другой. В теории де Бройля классическая оптика фигурировала в виде геометрической оптики, подчиняющейся принципу Ферма. В теории Шредингера фигурирует более общая, волновая оптика, подчиняющаяся принципу Гюйгенса. Этот принцип состоит в утверждении, что каждая точка, которой достигает волна, сама становится центром волн, распространяющихся во все стороны. Принцип Гюйгенса объясняет и прямолинейное распространение света в оптически однородных средах (таковым оно представляется в областях, бóльших по сравнению с длиной волны) и явления дифракции. Переходя от принципа Ферма к принципу Гюйгенса, мы тем

самым изменяем метод изучения волновых явлений. Нам даны локальные характеристики — поведение или состояние величины $\psi$ в бесконечно малых областях, вернее нам даны производные этой величины, и мы находим самую $\psi$-функцию. Математически это соответствует решению дифференциальных уравнений.

Волновой процесс описывается дифференциальным уравнением, в котором, с одной стороны, стоит вторая производная волновой функции $\psi$ по времени, а с другой — сумма вторых производных $\psi$ по координатам с множителем, равным квадрату фазовой скорости $u$:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = u^2\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right).$$

Операция, состоящая в получении вторых производных некоторой функции по координатам и суммировании этих производных, обозначается символом $\nabla^2$ — оператором Лапласа.

Если применить это обозначение, написанное выше уравнение может быть записано в виде

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = u^2\nabla^2\psi.$$

Это уравнение описывает распространение колебаний величины $\psi$ (волн) с фазовой скоростью $u$.

В случае плоской волны можно выразить вторую производную по времени от волновой функции $\psi$ через частоту колебания $\nu$ и затем перейти к механическим переменным частицы, движение которой связано с волновым процессом. Далее можно выразить эти переменные через полную энергию $E$ и потенциальную энергию $V$, так как кинетическая энергия равна их разности

$$\frac{mv^2}{2} = E - V.$$

После подстановок волновое уравнение принимает вид

$$\nabla^2\psi = \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\psi = 0.$$

Это и есть *уравнение Шредингера* для частицы. Оно было связано с определенной физической гипотезой. Для Шредингера реальны лишь волны, они лежат в основе корпускулярных явлений. Ученый писал, что возможно

«усмотреть в принципе Гамильтона также результат игры волн, который собственно и лежит в основе движения материальных точек, точно так же, как мы уже давно привыкли видеть волны в явлениях света с их принципом Ферма» [11].

Физическая интерпретация уравнения Шредингера могла быть найдена отнюдь не сразу. К ней шел долгий и сложный путь. Непосредственным эффектом теории Шредингера была возможность квантования энергии, получения дискретных значений энергии. Здесь необходимы некоторые пояснения, относящиеся к теории дифференциальных уравнений.

Физическое представление о дискретности энергии требовало адекватного математического представления. Пока сама идея дискретности выступала как частная идея, объясняющая некоторые особенности спектров, некоторые свойства излучения и структуры атома, пока можно было удовлетвориться произвольным выбором квантованных орбит в модели Бора, требование общего математического аппарата, автоматически дающего дискретные решения, не было слишком настоятельным. Но когда квантование электронных орбит начали объяснять общими, охватывающими всю природу физическими соотношениями, дело изменилось. Первоначально в континуальной по своим исходным принципам системе анализа бесконечно малых искали разделы, откуда можно было взять математические методы квантования. Теория Шредингера, взятая со стороны ее математического аппарата, была первой крупной находкой. Шредингер обратил внимание на один класс задач, существующий в теории дифференциальных уравнений.

Представим себе дифференциальное уравнение, в которое входят, во-первых, некоторые постоянные параметры и, во-вторых, функции пространственных координат, т. е. величины, меняющиеся от точки к точке. При некоторых значениях постоянных параметров дифференциальное уравнение имеет однозначное, конечное и непрерывное решение, т. е. мы получаем непрерывную и однозначную функцию координат во всем пространстве с конечным значением в каждой точке пространства.

---

[11] «Современная квантовая механика». Сб. статей. М.—Л., 1934, стр. 48.

Такая функция, иными словами, такое решение дифференциального уравнения, называется собственной функцией, а дискретные значения параметров, при которых такие решения возможны,— собственными значениями уравнения.

В уравнении Шредингера для частицы

$$\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\psi = 0$$

полная энергия частицы $E$ — постоянный параметр, а потенциальная энергия $V$ — функция координат, меняющаяся в пространстве от точки к точке. Непрерывные, конечные и однозначные решения уравнения Шредингера получаются *в том случае, когда параметр — полная энергия* (отрицательная) принимает дискретные значения.

Пока речь шла об одной частице, волновая функция $\psi$ сохраняла непосредственный физический смысл. Можно было представить себе, что в пространстве распространяются волны, которые и определяют некоторые эффекты в движении частицы со скоростью, связанной соотношением де Бройля с фазовой скоростью волн. Теория Шредингера не теряла наглядного характера, приданного волновой механике де Бройлем. Но с переходом к задачам, где фигурировало несколько частиц, положение изменилось. Потребовалось обобщенное уравнение. Оно имеет следующий вид:

$$\frac{1}{m_1}\nabla_1^2\psi + \frac{1}{m_2}\nabla_2^2\psi + \cdots + \frac{8\pi^2}{h^2}(E - V)\psi = 0,$$

где $m_1$, $m_2$, ... и т. д.— массы движущихся частиц, а $\nabla_1^2$, $\nabla_2^2$ ... и т. д.— соответствующие операторы Лапласа. Здесь уже волновая фракция $\psi$ — это функция не трех пространственных координат и времени, а большего числа переменных. Каждая частица независимо движется в трех измерениях, т. е. ее положение в пространстве характеризуется тремя переменными. В случае $n$ частиц таких переменных $3n$. Разумеется, к множеству упорядоченных систем, состоящих каждая из $3n$ чисел, можно применить геометрические соотношения. Но это будут соотношения многомерной геометрии, именно $3n$-мерной, изучающей «пространство», каждая точка которого задана $3n$ координатами. С таким так называемым конфигурационным пространством мы еще встретимся. Сейчас отметим только,

что при переходе к пространству конфигураций волновое уравнение теряет непосредственно наглядный характер. Волновая механика делает тем самым значительный шаг в сторону представлений, лишенных непосредственной наглядности. Впрочем, физические представления никогда не бывают *непосредственно* наглядными; *история* науки показывает, какие усилия абстрактной мысли понадобились, чтобы понятия классической физики (начиная с изотропности пространства и не падающих «вниз» антиподов) обрели наглядность. С другой стороны, принципиальная наглядность присуща каждой физической теории, отличающей действительный четырехмерный пространственно-временно́й континуум от условных «пространств». Принципиальная наглядность — псевдоним физической интерпретируемости. Существуют заведомо неинтерпретируемые, фиктивные построения: они не обладают принципиальной наглядностью. Но *относительно* не наглядные символические построения с течением времени получают физическую, пространственно-временну́ю интерпретацию и становятся элементами картины мира. В этом существенная сторона научного прогресса. Более того, широкое использование заведомо условных «пространств» позволяет скорее, полнее и конкретнее интерпретировать символы, и в этом смысле история так называемых «формализмов», история физической интерпретации символов, выключения из окончательных, подлежащих физической интерпретации уравнений условных функций входит в историю физической картины мира.

Теория Шредингера сделала большой шаг к использованию условных символов. Но еще больший шаг сделала в этом направлении появившаяся за несколько месяцев до статьи Шредингера статья Гейзенберга, положившая начало квантовой механике в собственном смысле.

### 5. Матрицы и операторы

Упомянутая выше статья Гейзенберга[12] начинается утверждением: в теорию микромира должны входить только наблюдаемые величины. Теория Бора вычисляет энергию водородного атома и другие наблюдаемые величины при помощи ненаблюдаемых величин, в частности положе-

[12] См. Zs. Phys., Bd 33, 1925, S. 879.

ния и периода обращения электрона. Однако правила теории Бора пригодны лишь в самом простом случае, они не пригодны для многоэлектронных систем и других более сложных условий. Может быть, недостаточность правил квантования зависит от их недостаточной «классичности» и вызвана отклонением от классической механики? «Это объяснение навряд ли разумно,— пишет Гейзенберг,— ведь универсальное по своему значению условие частот, введенное Бором, является таким радикальным отказом от классической механики, или — это будет лучше сказано с точки зрения волновой теории — от классической кинематики, что даже для простейших квантовых задач нельзя говорить о справедливости классической механики». По мнению Гейзенберга, недостаточность квантовой теории, напротив, вызвана применением ненаблюдаемых классических образов положения и периода обращения электрона в атоме. Вместо имеющихся правил нужна квантовая механика, аналогичная классической и использующая соотношения только между принципиально наблюдаемыми величинами.

На первый взгляд это требование Гейзенберга противоположно тенденции де Бройля и Шредингера. Создатели волновой механики стремились вывести законы микромира из классических по духу моделей волн материи и т. д. Создатели квантовой механики, и в первую очередь Гейзенберг, стремились радикально отказаться от классических представлений, связанных с картиной электрона, движущегося в атоме по определенной орбите с определенным импульсом. Они пришли к эквивалентным представлениям. Это выяснилось уже в 1926 г. Но сейчас для нас ясно, что эквивалентность *результатов* Шредингера и Гейзенберга уже содержалась в *их замыслах*, внешне противоречащих друг другу. Де Бройль и Шредингер хотели вывести парадоксальные условия Бора из классических идей. Они увидели в классической теории волн аналогии и модели, с помощью которых можно получить дискретные физические величины. Теория дифференциальных уравнений дала математические приемы для их вычисления. Гейзенберг ставил перед собой по существу аналогичную цель, он искал пути перехода от континуально-классических понятий атомной механики к дискретно-квантовым. Уже в первом, «доматричном» варианте квантовой механики Гейзенберг хотел заменить непрерывные по своей природе положения

электронов дискретными, квантовыми величинами. Его статья так и называлась: «О квантовом истолковании кинематических и механических соотношений». Классическая (хотя и с ограничением — парадоксальными квантовыми условиями) картина электронов, движущихся по орбитам вокруг ядра и обладающих классическими свойствами пространственной локализации и индивидуальности, многое объяснив, оказалась все же недостаточной. Де Бройль и впоследствии Шредингер заменили электрон волновым пакетом, Гейзенберг пошел иным путем. Он рассматривает колебания координат электрона. Их нужно заменить иным представлением, из которого вытекали бы квантовые условия. Колебания координат электрона, т. е. «принципиально ненаблюдаемый» процесс, можно было разложить в ряд гармонических колебаний, согласно теореме Фурье. Задача Гейзенберга состояла в том, чтобы перейти от координат движущегося электрона, от электронных орбит к энергетическим уровням атома и к частотам и интенсивностям спектральных линий. Такой переход существует и в классической теории. Классическая теория сопоставляет электронную орбиту с наблюдаемыми частотами и амплитудами электромагнитных волн, излучаемых электроном при движении по этой орбите. Если заданы все амплитуды и частоты излученных волн и, следовательно, заданы коэффициенты Фурье, можно однозначно определить орбиту электрона.

В квантовой теории положение несколько иное. И здесь совокупность амплитуд и частот излучения можно считать полной характеристикой атомной системы. Но нельзя рассматривать амплитуды и частоты излучения как результат движения электрона по орбите, результат колебаний координат электрона при *данном* состоянии атома. Гейзенберг предлагает вместо коэффициентов Фурье в разложении классического колебания электрона ввести величины, соответствующие этим классическим коэффициентам, но существенно иные.

Главное отличие этих величин, заменяющих коэффициенты разложения классического орбитального движения, состоит *в двойственности*, в соответствии каждой величины двум стационарным состояниям. В новом, квантовом представлении каждый коэффициент $q$ соответствует переходу атома из состояния $n$ в состояние $m$.

Из представления об энергетических уровнях, разность которых в теории Бора соответствует спектральной линии,

т. е. определенной частоте, следовала рациональность горизонтально-вертикальной записи уровней энергии. Гейзенберг реализовал эту идею, содержавшуюся implicite в теории Бора. Он представил состояния атома и переходы из одного состояния в другое в виде таблицы, где каждая клетка находилась на пересечении двух рядов — горизонтального и вертикального, т. е. обозначалась элементами двух множеств и соответствовала, вообще говоря, переходу из одного стационарного состояния в другое. Замена рядов такими квадратными таблицами, представление физических соотношений двойными множествами — характерная особенность теории Гейзенберга. Каждой динамической переменной соответствует таблица, в которой коэффициенты, стоящие в клетках, соответствуют изменениям переменной при переходе атома из одного состояния в другое. Клетки, расположенные по диагонали таблицы, соответствуют переходу в такое же состояние, т. е. стационарному состоянию.

Когда Гейзенберг пришел к этим представлениям, он не знал, что пользуется понятиями, имеющими весьма точный эквивалент в созданной математиками в середине XIX в. *теории матриц*. Борн и Иордан очень быстро обнаружили, что матрицы являются действительным аппаратом теории Гейзенберга. Таблицы двойственных коэффициентов получили каноническое название, и квантовая механика смогла воспользоваться разработанной и строго обоснованной системой понятий и теорий.

В своем нобелевском докладе «Статистическая интерпретация квантовой механики» Борн рассказывает, как летом 1925 г. Гейзенберг, заболевший и отправившийся лечиться на берег моря, передал ему свою статью для опубликования, если статья понравится Борну. Прочитав статью, Борн отправил ее в «Zeitschrift für Physik». Думая над ее содержанием, он вспомнил об алгебраической теории, с которой познакомился много ранее, в годы учения во Вроцлаве. Борн увидел, что квадратные таблицы Гейзенберга соответствуют матрицам. Оставались, однако, некоторые неясные моменты. Борн привлек к сотрудничеству своего ученика Паскуаля Иордана, и их совместная статья вскоре появилась в том же журнале [13]. Затем в течение некоторого времени Борн, Иордан и Гейзенберг,

[13] Zs. Phys., Bd 34, 1925, S. 858.

обмениваясь письмами, придали теории сравнительно законченный вид и изложили ее в виде статьи трех авторов [14]. Статья эта еще не успела увидеть свет, когда Дирак опубликовал свою работу [15], в которой таблицы Гейзенберга трактовались как математические символы со свойствами, аналогичными свойствам матриц. Дирак познакомился с первоначальными идеями Гейзенберга благодаря П. Л. Капице, который предложил Гейзенбергу летом 1925 г. выступить в кембриджской лаборатории Капицы. Гейзенберг впоследствии вспоминал об инициативе Капицы, о своем кембриджском докладе и о работе 23-летнего студента Дирака, применившего по сравнению с построениями геттингенских теоретиков более изящные методы, как о характерном примере международного научного сотрудничества [16].

Гейзенберг, Борн и Иордан изложили квантовую механику в виде алгебры матриц. Здесь достаточно указать на *некоммутативность* умножения матриц. В зависимости от того, умножаем ли мы матрицу $q$ на матрицу $p$ или, наоборот, матрицу $p$ на матрицу $q$, мы получаем произведения $qp$ и $pq$ с ненулевой разностью. Такие некоммутативные произведения $qp$ и $pq$ играют первостепенную роль в матричном исчислении. Если взять матрицу $q$, соответствующую координате электрона, и матрицу $p$, соответствующую его импульсу, то произведения матриц $qp$ и $pq$ будут связаны соотношением

$$qp - pq = \frac{h}{2\pi i}.$$

Оно называется *перестановочным соотношением.* Результаты применения перестановочного соотношения совпадают с результатами, к которым пришел Шредингер. Гейзенберг, Борн и Иордан пришли, в частности, к условию частот, сформулированному в свое время Бором: частота кванта, излучаемого при переходе от одного уровня энергии к другому, равна изменению энергии, деленному на постоянную Планка $h$.

Квантовая механика Гейзенберга, Борна и Иордана выводит условие частот из дискретности динамических ха-

[14] Zs. Phys., Bd. 35, 1926, S. 557.

[15] Proc. Roy. Soc., v. 108, 1925, p. 642.

[16] См. В. Гейзенберг. Философские проблемы атомной физики. М., 1953, стр. 125—126. Изд. 3. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008.

рактеристик атома. В теориях де Бройля и Шредингера путь был обратный: оптическая дискретность, существование постоянной $h$ как оптической константы было исходным обстоятельством, и из него выводилось боровское квантование электронных орбит. Переходная по своему характеру боровская модель 1913 г. по существу не объясняла включения оптической константы в механику атома. Квант действия существовал как оптическая константа в теории спектров и как механическая — в теории атома. С 1925 г. эти области объединяются не только в смысле совпадения основной оптической и основной атомно-динамической константы. Две роли $h$ выводятся одна из другой: в волновой механике динамическая из спектральной, в квантовой механике Гейзенберга, Борна и Иордана — наоборот.

В конце 1925 г. Борн, находившийся в то время в США по приглашению Массачузетского технологического института и работавший там вместе с Норбертом Винером, пришел к мысли о представлении физических величин в виде операторов. В статье, напечатанной в 1926 г., Борн и Винер показали, что с каждой динамической переменной можно сопоставить оператор, подобно тому как это было сделано немного раньше с матрицами. С указанного времени операторное исчисление становится основным математическим аппаратом атомной физики и получает широкое применение и развитие.

Теория линейных операторов — математическая теория — служит характерной иллюстрацией закономерностей развития физики. Историческая связь между физическими теориями не всегда бывает непосредственной. Иногда физическая теория толкает математику к созданию системы новых понятий, до поры до времени не получающих физической интерпретации, а затем другая физическая теория пользуется этими понятиями и придает им физический смысл. К началу XX в. под влиянием значительного развития классической физики, механики и астрономии математика подошла к обобщению основного понятия анализа — понятия функции. Если под функцией $y = f(x)$ понимать соответствие между множеством чисел $x$ и множеством чисел $y$, то можно говорить о более общих соответствиях — уже не между числами, а между функциями — об операторах. Оператор задан, если известен закон, по которому функции $f(x)$ ставится в соответствие другая функция $\varphi(x)$. Операторы будут обозначаться в дальней-

шем буквами со значком $\hat{L}$ над ними, например $\hat{L}$. Мы можем взять в качестве второй функции $\varphi(x)$ функцию $f(x)$, умноженную на переменную $x$, либо функцию $f(x)$, умноженную на любую постоянную величину $a$, либо производную от $f(x)$ по $x$ и т. д. В каждом случае переход от $f(x)$ к $\varphi(x)$ обозначается соответствующим символом, стоящим перед $f(x)$. В первом случае $\hat{L}_1 f(x) = \varphi(x) = xf(x)$; во втором случае $\hat{L}_2 f(x) = \varphi(x) = af(x)$; в третьем случае

$$\hat{L}_3 f(x) = \varphi(x) = \frac{\partial f(x)}{\partial x}.$$

Мы можем применить к функции один оператор $\hat{L}_1$ (т. е. превратить ее определенным образом в другую функцию), а затем другой оператор $L_2$ и можем применить их в обратном порядке. Такое последовательное применение операторов называется их «умножением». Умножение операторов в общем случае некоммутативно. Операторы, приведенные в качестве первого и второго примеров, коммутативны, т. е. обладают коммутативностью умножения: помножить функцию на переменную и на постоянную можно в любом порядке. Но произведение оператора дифференцирования и оператора, означающего умножение на переменную $x$, некоммутативно: помножив функцию и затем дифференцируя, мы получим иной результат, чем при дифференцировании и последующем умножении на $x$.

Упомянем особенно важные для квантовой механики понятия *собственной функции и собственного значения* оператора. Действие оператора $\hat{L}$ на его собственную функцию сводится к умножению на число $\lambda$. В этом случае $\lambda$ называется собственным значением оператора $\hat{L}$. Оператор в отношении своих собственных функций как бы десимволизируется: символ $\hat{L}$, означающий некоторую операцию, заменяется обычным множителем: $\hat{L}f = \lambda f$. Собственные значения оператора образуют его спектр: непрерывный (все числа, либо все положительные, либо все отрицательные числа являются собственными значениями оператора) или дискретный (некоторые числа, составляющие дискретный ряд).

Вернемся к физическим проблемам. В квантовой механике операторы применяются для изображения динамических переменных: координат, компонент, энергии, им-

пульса и т. д. Непосредственный смысл такого перехода от обычных величин к операторам состоит прежде всего в возможности компромисса между новыми, неклассическими понятиями с классической механикой, в возможности применить схемы классической механики к микромиру, в возможности использовать в новой области понятия координат частицы, составляющих ее импульса и других динамических переменных. Если каждой из переменных сопоставить оператор и подчинить эти операторы классическим соотношениям между соответствующими величинами, то мы придем к соотношениям квантовой механики. Следовательно, сам переход к операторам соответствует специфике квантовых соотношений и, в последнем счете, специфическим закономерностям микромира. Этот переход позволяет перевести квантовые соотношения на язык классических соотношений.

Динамические переменные представлены операторами. Это первое допущение квантовой механики. Второе допущение, физически интерпретирующее операторы, относится к собственным значениям $\lambda$ и собственным функциям $f$ оператора $\hat{L}$. Если переменная $L$ изображается оператором $\hat{L}$, то собственное значение оператора означает определенное число, которое мы получаем, измеряя переменную $L$ в состоянии системы, изображенном собственной функцией $f$. Собственная функция $f$ описывает состояние системы, в котором $L$ имеет определенное значение. Это исходный тезис квантовой механики.

## 6. Волны вероятности

Модификация классических понятий при переходе в новую область состоит прежде всего в том, что они теряют, вообще говоря (в частном случае собственных состояний — сохраняют), свою определенность. Волновая функция $\psi$ — вернее, ее квадрат — указывает *вероятность* определенных значений классических динамических переменных. Такую интерпретацию волновой функции выдвинул в 1926 г. Борн [17].

Борн рассматривает пространство конфигураций $3n$ измерений. Координаты в этом пространстве — упорядо-

[17] Zs. Phys., Bd 37, 1926, S. 563; Bd. 38, 1926, S. 803.

ченные системы $3n$ чисел — определяют точки пространства конфигураций. От точки к точке меняется значение волновой функции $\psi$. Физический смысл этой функции — вероятность определенной конфигурации частиц, вероятность того, что она осуществляется.

Все это построение выглядит значительно проще в случае одной частицы, когда волновая функция определяется простым, необобщенным уравнением Шредингера. Тогда вместо пространства конфигураций мы имеем обычное трехмерное пространство. В каждой точке трехмерного пространства волновая функция имеет определенное значение, и бесконечно малому приращению координат соответствует бесконечно малое приращение волновой функции. Она, таким образом, непрерывна. Квадрат волновой функции означает *вероятность встретить частицу в данной точке.*

Все это можно пояснить следующим примером. Пучок электронов, летящих параллельно и с одинаковой скоростью, проходит через две узкие щели в непрозрачном экране и затем попадает на флуоресцирующий экран. Если электроны — это частицы в классическом смысле, то на флуоресцирующем экране должны появиться две светлые полоски — в местах, куда попадают параллельно летящие электроны. В действительности на флуоресцирующем экране появляются интерференционные полосы. Их можно объяснить по аналогии с интерференционным опытом Юнга — классическим доказательством волновой природы света. Щели в непрозрачном экране — источники двух сферических волн. Эти две волны попадают на каждую точку флуоресцирующего экрана. Там, где разность хода волн равна целому четному числу полуволн, фазы обеих волн совпадают и суммарная амплитуда максимальна; там же, где указанная разность равна нечетному числу полуволн, фазы противоположны, суммарная амплитуда равна нулю и видны темные интерференционные полосы. При корпускулярном представлении электронов этот опыт может быть объяснен так: светлые полосы получаются там, куда попадает максимальное число электронов, темные полосы — куда электроны вовсе не попадают. Значит, максимальная амплитуда соответствует максимальной *плотности* электронов, попадающих на экран. Если взять квадрат амплитуды, т. е. величину, всегда положительную, ее можно считать вероятностью попадания электрона. При большом

числе электронов в пучке их плотность в данной точке экрана соответствует вероятности встретить здесь каждый электрон. Представим себе, что через описанную установку проходит один электрон, затем другой и т. д. Отмечая каждый раз место, куда попадает электрон, мы при большом числе опытов обнаружим, что максимальное число попаданий окажется в тех местах экрана, где расположены точки максимальных суммарных амплитуд в результате наложения волн, исходящих из двух щелей, что число попаданий соответствует везде квадрату амплитуды. Что же распространяется волнообразно в случае *одного* электрона, что распределяется в этом случае на всем экране? Ответ Борна таков: волнообразно распространяется, суперпонирует, интерферирует, образует максимумы и минимумы *вероятность* попадания электрона на то или иное место флуоресцирующего экрана.

Такой взгляд вытекает из операторного представления физических величин. Напомним физическую интерпретацию собственных значений $\lambda$ оператора $\hat{L}$, определенных уравнением

$$\hat{L}\psi_n = \lambda_n \psi_n.$$

Здесь $\lambda_n$ — *однозначный и определенный* результат измерения переменной $L$, сделанного в тот момент, когда система находится в состоянии $\psi_n$.

Речь идет о собственных значениях $\lambda_n$ оператора $\hat{L}$ и о таких состояниях $\psi_n$, когда переменная $L$ может быть определена однозначным образом. Можно ли придать физический смысл иным, не являющимся собственными значениям $\lambda$? Допустим, что такие значения соответствуют среднему результату большого числа измерений переменной $L$. Иначе говоря, в состояниях $\psi$, когда переменная $L$ не может быть определена однозначным образом, однозначно может быть определена *вероятность* данного значения переменной. В этом случае $\lambda$ определяет *математическое ожидание* — величину, к которой среднее значение переменной будет приближаться по мере увеличения числа ее измерений.

Примером может служить определение среднего значения координаты $x$. Это значит, что в качестве оператора $\hat{L}$ фигурирует оператор координаты $x$. Квадрат волновой функции — это плотность вероятности местонахождения, вероятности найти частицу в определенном месте.

Чем больше значение волновой функции $\psi$ (вернее, квадрата ее модуля в данном интервале $dx$), тем больше вероятность, что частица окажется в указанном интервале. В приведенном опыте с прохождением пучка электронов через две узкие щели и появлением интерференционных полос на флуоресцирующем экране все это было видно весьма наглядно. Там, где волновая функция была максимальной, плотность электронов достигала максимума. Если же пучок состоял из одного электрона, то точкам, где фазы двух волн совпадали и величина $|\psi|^2$ имела максимальное значение, соответствовала наибольшая вероятность попадания этого электрона. При многократном повторении опыта в эти пункты попадало наибольшее число электронов. Повторим два допущения, придающих физический смысл операторам, волновым функциям и их соотношениям. Первое можно кратко сформулировать так: «собственные значения оператора — это определенные значения переменной». Второе: «все значения оператора — это средние значения переменной». Из второго допущения можно вывести первое допущение; из первого нельзя вывести второе: оно оказывается более общим. Напрашивается предположение, что этому соотношению между двумя основными пунктами операторного представления соответствует определенное соотношение между физическими процессами, что реальные «состояния неопределенности» являются общим случаем, а «состояния определенности» — частным.

В квантовой механике соотношения между средними значениями, вообще говоря неопределенными в каждом отдельном состоянии системы, совпадают с классическими соотношениями между определенными, классическими переменными. Эренфест показал, что средние значения динамических переменных в микроскопических системах подчиняются уравнениям классической механики. Микросистемы — это системы, где результаты отдельных измерений отступают от классической однозначности, где единичные значения физических величин определяются не классическими, а квантовыми уравнениями. Эренфест, пользуясь операторным представлением динамических переменных, доказал, что, в отличие от отдельных, средние значения физических величин в задачах квантовой механики подчиняются классическим соотношениям. Теорема Эренфеста — одна из теорем квантовой механики,

отчетливо показывающих ее отношение к классической механике, ее логическую (и, можно думать, историческую) дислокацию между классической картиной мира и представлением, еще более радикально преодолевающим и классическую дискретность (тождественная себе частица с координатами — функциями времени) и классическую непрерывность.

## 7. Неопределенность и дополнительность

Смысл матриц и операторов состоит в том, что они позволяют воспользоваться классическими понятиями для описания процессов в микромире и указывают границы такого применения классических понятий в микромире. Мы можем говорить о положении и импульсе частиц и об их энергии в тот или иной точно зафиксированный момент, если операторы переменных — координат и импульса, энергии и времени — коммутируют. Но, вообще говоря, эти операторы не коммутируют. Если собственные функции $\lambda_n$ оператора $\hat{L}$ (когда переменная $L$ может быть точно определена) соответствуют одним состояниям, а собственные функции $\mu_n$ оператора $\hat{M}$ — другим состояниям, то в одном опыте переменные $L$ и $M$ не могут быть определены с неограниченной точностью. Вообще говоря, функция $\lambda$ определяет лишь вероятность тех или иных значений динамической переменной — среднее значение при большом числе измерений. Операторное представление позволяет получить общее решение вопроса о возможности одновременного точного измерения двух динамических переменных. Переменные $L$ и $M$ могут быть одновременно измерены с любой точностью, если соответствующие операторы $\hat{L}$ и $\hat{M}$ обладают общими собственными функциями $\psi_n$. Иными словами, если

$$\hat{L}\psi_n = \lambda_n\psi_n \quad \text{и} \quad \hat{M}\psi_n = \mu_n\psi_n,$$

то как $L$, так и $M$ в одних и тех же состояниях будут иметь определенные значения $\lambda_n$ и $\mu_n$. Здесь, конечно, не принимаются во внимание несущественные для теории экспериментальные погрешности — колебания тех или иных факторов, ошибки наблюдения и другие аналогичные обстоятельства. Принципиально, при сформулированном условии, измерения $L$ и $M$ дадут вполне определенные

числа $\lambda_n$ и $\mu_n$. Коммутативность операторов выражает возможность одновременного точного измерения представляемых этими операторами динамических переменных. Когда же операторы некоммутативны и соответственно не имеют общих собственных функций, нельзя найти такое состояние системы, при котором представленные этими некоммутативными операторами динамические переменные одновременно имели бы определенное значение. Такими переменными являются, например, координата $x$ и составляющая $p_x$ импульса по оси $X$. Операторы $\hat{x}$ и $\hat{p}_x$, представляющие эти динамические переменные, некоммутативны. Их произведения отличаются одно от другого и связаны перестановочным соотношением

$$\hat{x}\hat{p}_x - \hat{p}_x\hat{x} = \frac{h}{2\pi i}.$$

Как согласовать это перестановочное соотношение с возможностью применять понятия импульса и положения к частице?

Гейзенберг показал, что перестановочные соотношения могут быть согласованы с таким применением, если допустить некоторую неопределенность значений координат и составляющих импульса частицы. Неопределенность измерений координаты $x$ обозначим через $\Delta x$, а неопределенность измерений составляющей импульса $p_x$ — через $\Delta p_x$. Тогда соотношение неопределенностей выражается неравенством

$$\Delta x \Delta p_x \geqslant \frac{h}{4\pi}$$

и аналогичными неравенствами для других координат и составляющих импульса

$$\Delta y \Delta p_y \geqslant \frac{h}{4\pi}, \quad \Delta z \Delta p_z \geqslant \frac{h}{4\pi}.$$

Смысл неравенства Гейзенберга очевиден: если увеличивается точность измерения компоненты импульса, соответственно уменьшается точность измерения координаты и наоборот.

В работах Гейзенберга и Бора 1927 г. принцип неопределенности выводится из общих рассуждений об измерении и воздействии измерения на измеряемые объекты. Рассуждения на эту тему идут примерно по следующей схеме. Объекту измерения противостоит измерительный

прибор. Действие прибора направлено на измеряемый объект, действие объекта — на прибор, и в таком взаимодействии состоит измерение, которое по самой своей природе означает изменение объекта. В макроскопическом мире такими изменениями можно пренебречь, в микромире они существенны. Далее идут иллюстрации этого принципа: воздействие процесса измерения координат частицы на ее импульс и воздействие измерения импульса на положение частицы.

Пусть целью эксперимента будет измерение координаты $x$ электрона, причем система координат связана с двумя экранами, поставленными параллельно оси $Y$. Пучок электронов, летящих параллельно оси $x$, проходит через щель $AB$ первого непрозрачного экрана и попадает на второй, флуоресцирующий экран [18].

Сцинтилляция на втором экране покажет, что в момент $t$ электрон прошел через щель первого экрана. Тем самым определено положение электрона в этот момент относительно данной системы координат. Точность, с которой определено его положение в момент $t$, зависит от ширины щели; нам известно только, что электрон прошел в интервале между краями щели. Уменьшая щель, мы можем неограниченно увеличивать точность измерения координаты электрона. Можно ли здесь, в описанных явлениях, усмотреть какое-либо действие процесса измерения на измеряемый объект? Нет, пока мы рассматриваем электрон как частицу и только, мы не можем говорить о действии прибора на электрон. Объектом измерения была координата электрона, и в пределах ширины щели изменение координаты не могло бы оказать никакого воздействия на экран, *если бы электрон был частицей* в классическом смысле, т. е. не обладал бы волновыми свойствами. В таком случае мы могли бы (разумеется, только в мысленном эксперименте) довести ширину щели до размера электрона, а принимая электрон за непротяженную точку,— бесконечно уменьшать щель, и электрон, прошедший через щель, мог бы не испытать со стороны экрана никакого воздействия, изменяющего координату электрона.

---

[18] См. В. Гейзенберг. Физические принципы квантовой теории. Л.— М., 1932, стр. 25; Э. Шпольский. Атомная физика. М.— Л., 1944, стр. 275—278.

Однако в действительности электрон обладает волновыми свойствами и будет испытывать дифракцию. Это означает, что электрон в результате взаимодействия с краями щели будет получать некоторый добавочный импульс. Это взаимодействие, связанное с волновыми свойствами частицы, состоит в изменении импульсов электрона и щели. Чем у́же щель, тем шире будет главный дифракционный максимум и неопределенность в значении импульса будет больше. Можно ли это значение контролировать? Да, можно, но в описанном эксперименте только одним способом: сделать первый экран подвижным и по сдвигам экрана судить об изменении импульса электрона при прохождении через щель. Тогда мы сможем с какой угодно точностью измерить импульс в момент $t$, когда электрон проходит через первый экран. Но тогда система, связанная с экраном, перестает быть совершенно неподвижной, и мы уже не можем с помощью этой системы точно определить координату электрона в момент $t$. Попробуем уменьшить неопределенность импульса, уменьшая взаимодействие электрона и экрана. Для этого нужно расширить щель; значит, в этом случае точность определения импульса возрастает за счет точности определения положения электрона.

До сих пор речь шла о координате, т. е. *о положении в пространстве*, с одной стороны, и *об импульсе* — с другой. Но квантовая механика включает тезис о невозможности одновременного точного измерения и другой пары: времени $t$ и энергии $E$. Произведение неопределенностей $\Delta t$ и $\Delta E$ имеет размерность действия и не может быть меньше постоянной Планка, деленной на $2\pi$.

Учитывая последующие работы Бора, это соотношение можно написать в виде

$$\Delta (E' - E)\, \Delta t \geqslant \frac{h}{2\pi}.$$

Первый множитель, стоящий в левой части неравенства, представляет собой неопределенность в измерении приращения энергии ($E$ — энергия при начале измерения, $E'$ — при конце), а $\Delta t$ — неопределенность момента времени, в который производилось измерение энергии — некоторый промежуток времени.

Теперь обратимся к статье Гейзенберга о принципе неопределенности. Эта статья «О наглядном содержании

квантовой кинематики и механики», опубликованная в марте 1927 г. [19], состоит из четырех параграфов. В первом даны определения понятий положения, скорости, энергии и т. д.— определения, сохраняющие свое значение в квантовой механике, и указаны условия, при которых они сохраняют значение. Во втором доказывается, что основой статистического характера соотношений квантовой механики служит характерная неточность определения классических переменных при их одновременном измерении. Третий параграф посвящен квантовомеханическому пониманию макроскопических процессов и четвертый — некоторым мысленным экспериментам, иллюстрирующим и доказывающим высказанные тезисы.

Гейзенберг начинает с обоснования исходного, по его мнению, тезиса квантовой механики: «Все понятия, применяемые в классической теории для описания механической системы, могут быть аналогичным образом строго определены и для атомных процессов». Анализ начинается с понятия положения и скорости. Полному и безусловному одновременному применению этих понятий для описания микромира противоречат, во всяком случае на первый взгляд, перестановочные соотношения

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i}.$$

Они заставляют сомневаться в применимости понятий скорости и положения в квантовой механике. Чтобы такое применение удовлетворяло перестановочному соотношению, понятия положения и скорости должны обладать свойствами, неизвестными классической теории. Далее, для микромира существенна прерывность некоторых процессов, в том числе движения материальной точки. В классической физике можно говорить о движении материальной точки через смежные точки пространства, образующие траекторию такого движения. Направление скорости определяется касательной к траектории. В квантовой теории точки пребывания частицы разделены конечными промежутками. Поэтому теряет смысл понятие скорости как производной; скорость определяется двумя или бо́льшим числом положений центра тяжести частицы. Соответственно для каждого положения $a_n$ частицы можно гово-

[19] W. Heisenberg. Zs. Phys., Bd 43, 1927, S. 172.

рить о двух скоростях: одна определяется положениями $a_{n-1}$ и $a_n$, другая — положениями $a_n$ и $a_{n+1}$.

Высказав эти соображения об объективной специфичности понятий положения и скорости в микромире, о необходимости ограничить точность определения положения и скорости для строгого определения этих понятий в квантовой механике, Гейзенберг отходит от характеристики самих квантовых объектов. Он рассматривает особенности экспериментов, производимых над квантовыми объектами, причем экспериментов, в которых участвуют «классические приборы», т. е. приборы, регистрирующие положение и скорость. Именно такой анализ квантовой механики и кинематики Гейзенберг считает наглядным истолкованием, которое имеется в виду в приведенном выше названии статьи.

Гейзенберг дает следующее определение наглядности: «Физическая теория получает наглядное истолкование, если во всех простейших случаях качественно представимы ее экспериментальные следствия, причем применения теории не приводят к противоречиям».

Значит, представление о физическом объекте, не связанное с экспериментом, не является наглядным. *Наглядность*, о которой говорит Гейзенберг, соответствует *наблюдаемости*, о которой он говорил в 1925 г. Заметим, что речь идет об экспериментах с участием «классических приборов».

Гейзенберг рисует наглядную картину эксперимента, определяющего положение частицы. Такое определение может быть произведено с любой точностью. Примером здесь служит мысленный эксперимент, производимый с помощью микроскопа, через который рассматривают электрон. Этот «микроскоп Гейзенберга» получил широкое распространение в литературе по квантовой механике и стал началом множества аналогичных мысленных экспериментов. Принципиально от него не отличается приведенный выше мысленный эксперимент с диафрагмой и флуоресцирующим экраном. Определяя с помощью микроскопа положение электрона и освещая для этого электрон, мы воздействуем на него. Чем меньше длина волны, тем больше энергия фотона, тем больше воздействие его на электрон. Но точность определения положения электрона обратно пропорциональна длине волны: мы можем определить положение электрона с точностью до длины волны.

Импульс электрона в момент, когда на него падает свет, определен с точностью до изменения импульса под влиянием фотона. Следовательно, чем точнее определено положение, тем менее точно определен импульс, и наоборот. Положение и импульс связаны известным нам соотношением неопределенностей.

Соотношение неопределенностей можно представить, разделив фазовое пространство на ячейки, объемы которых равны $h$. Нетрудно видеть, что фазовое пространство, где координатами служат пространственные координаты и импульсы, может быть разделено на ячейки, объем которых имеет размерность действия. Представим себе двумерное фазовое пространство, соответствующее движению электрона по оси $X$. Абсциссами в этом пространстве служат пространственные координаты $x$, а ординатами — импульсы $p_x$. Предположим, что нет возможности проникнуть внутрь этих ячеек с метрическими соотношениями, что внутри ячеек мы можем пользоваться лишь аффинными соотношениями. Тогда можно определить $x$ с точностью до горизонтального основания $\Delta x$ ячейки $h$, а импульс — с точностью до вертикальной высоты $\Delta p$ ячейки. Ячейки обладают «упругостью», они могут бесконечно деформироваться, но сохранят при этом неизменную площадь, равную $h$. Чтобы получить более точное представление о положении частиц, нужно сжать фазовое пространство по горизонталям, но тогда увеличится высота $\Delta p_x$ ячеек. Когда $\Delta x \to 0$, т. е. точность определения положения электрона стремится к бесконечности, тогда $\Delta p_x$ растут, *стремятся к бесконечной протяженности*, т. е. импульсы становятся совершенно неопределенными. В приведенном примере с микроскопом это соответствует бесконечно малой длине волны света и бесконечно большой энергии фотона.

Общий вывод из содержания первого параграфа статьи Гейзенберга таков: все классические понятия могут быть строго определены для атомных процессов при условии допущения характерной неопределенности, заданной соотношением неопределенностей.

В послесловии Гейзенберг сообщил о соображениях Бора, ознакомившегося со статьей. Бор обратил внимание Гейзенберга на то, что в построениях последнего не учитывается некоторое существенное обстоятельство. «Прежде всего, неопределенность наблюдения... непосредственно

связанная с требованием одновременного ответа на различные вопросы, из которых одни имеют смысл в корпускулярной теории, а другие — в волновой». Речь идет о принципе дополнительности. Высказав его уже в 1927 г., Бор опубликовал фундаментальную работу по этому вопросу в 1928 г. [20] и затем возвращался к нему в ряде других работ.

Бор считает принцип неопределенности следствием более общего принципа, принципа дополнительности, согласно которому нельзя в одном эксперименте обнаружить и волновые и корпускулярные свойства материи. Изложим соображения Бора с помощью следующего примера [21]. Электроны, либо электромагнитные волны одной частоты, т. е. поток одинаковых фотонов, падают на дифракционную решетку и, отражаясь от нее, попадают на фотопластинку, на которой мы увидим светлые и темные дифракционные полосы. Положение этих линий полностью определяется волновыми свойствами потока: там, где разность хода волн, отраженных от отражающих штрихов решетки, равна целому числу волн, будут видны светлые полосы; там, где эта разность будет равна нечетному числу полуволн, будут видны наиболее темные полосы. Если мы будем посылать на решетку и затем фотографировать по одной частице, результат будет тот же.

Если полученная фотография отражает какие-то свойства отдельных электронов, то это вероятность их пребывания в той или иной точке, т. е. также континуальное, волновое свойство.

Попробуем теперь экспериментально обнаружить корпускулярные свойства частиц, именно: их локализацию в момент отражения от решетки. Для этого будем регистрировать смещение штрихов дифракционной решетки под воздействием попавшей на этот штрих частицы. Тогда смещение штрихов смажет интерференционную картину.

Сделаем еще одну попытку одновременно обнаружить волновые и корпускулярные свойства частиц. Направив поток частиц через две щели непрозрачного экрана на

---

[20] См. N. Bohr. Naturwiss., Bd 16, 1928, S. 245.

[21] См. В. Гейзенберг. Физические принципы квантовой теории. Л.— М., 1932, стр. 60—62; Э. Шпольский. Атомная физика, стр. 272—281.

флуоресцирующий экран, будем наблюдать появившиеся на последнем интерференционные полосы (волновые свойства) и в то же время оставим себе возможность наблюдать, через какую щель прошла частица (корпускулярные свойства). Тогда мы приходим к противоречию. Предположим, мы определили, что частица прошла через верхнюю щель. Можем ли мы сказать, куда полетит частица дальше, в какое место на флуоресцирующем экране она попадет? Если частица в момент прохождения сквозь *первый экран локализована в пространстве* и мы можем определить, через какую щель она прошла, значит вторая щель не влияет на движение *этой* частицы, не определяет ее дальнейшего пути. Но в действительности распределение частиц на втором экране зависит от взаимного расположения обеих щелей; значит, вероятность того или иного последующего движения одной частицы, прошедшей через одну щель, определяется и второй щелью. И тут перед нами кардинальный вопрос: если частица прошла через одну щель, то какой же физический объект, определяющий последующую локализацию частицы, прошел через вторую щель? Как только мы задаем этот вопрос, иными словами, как только хотим объяснить интерференционную картину на втором экране, нам приходится отказываться от такого вопроса и при этом вообще отказываться от корпускулярного аспекта. Прохождение частицы через ту или иную щель можно обнаружить, если, например, частица отклоняет эту щель в сторону. Но при этом, в свою очередь, смажется интерференционная картина на втором экране.

Анализируя подобные опыты, Бор отметил, что каждый эксперимент обнаруживает либо волновые, либо корпускулярные свойства вещества и не может обнаружить другие. Поэтому волновые и корпускулярные свойства нужно считать не противоречащими друг другу, а дополняющими друг друга.

Отметим здесь — это важно для последующего, что ни Бор, ни Гейзенберг не придавали принципу дополнительности и принципу неопределенности смысла, который часто выражается фразами: «наблюдение возмущает явление» или «измерение создает физические атрибуты объектов». Бор писал, что такие утверждения неправильны: «явление» по своему существу объективно характеризуется возможностью экспериментальной проверки и соответ-

ствующей информации [22]. Независимо от наблюдения микрообъекты взаимодействуют с макрообъектами, т. е. с объектами, к которым неприменима квантовая детализация. Физические явления неотделимы от такого взаимодействия. Поэтому «прибор», о котором идет речь в квантовой механике, это нечто, совершенно не связанное с наблюдением, это нечто, в принципе допускающее наблюдение, но существующее и в отсутствие наблюдения.

Макс Борн в одной из своих статей [23] излагает принцип дополнительности в очень краткой и ясной форме, позволяющий видеть объективный смысл этого принципа. Исходное обстоятельство — противоположность между «импульсно-энергетическими» свойствами частицы и ее *волновыми* свойствами, частотой и волновым числом. Между первыми и вторыми установлены соотношения, выражающиеся в двух основных формулах квантовой механики. Первое из них найдено Планком; оно связывает энергию $E$ частицы с частотой $\nu$ сопоставленной ей волны

$$E = h\nu,$$

где $h$ — постоянная Планка. Второе соотношение, установленное Эйнштейном и де Бройлем, связывает импульсы $\mathbf{p}$ частицы с волновым вектором $\mathbf{k}$ соответствующей волны де Бройля:

$$\mathbf{p} = h\mathbf{k}.$$

Частица рассматривается так, как будто ее размеры несущественны, т. е. как точка. Она может быть точно локализована в пространстве и времени. Но энергия и импульс этой точечной частицы выражаются через волновой процесс, т. е. через нечто, длящееся бесконечное время в бесконечном пространстве. Если подойти к волновому процессу с требованием пространственно-временно́й локализации, встретятся неизбежные осложнения. Ограничивая волновой процесс во времени и пространстве, мы нарушаем его характер. Борн приводит пример такого нарушения не из квантовой области, а из акустики. Утверждение «музыкальный тон длится определенное время»

---

[22] См. Н. Бор. Квантовая физика и философия. «Успехи физических наук», 1959, 67, вып. 1.

[23] См. Proc. Phys. Soc., v. 66A, 1953, p. 501. Русск. пер. см. в кн.: «Вопросы причинности в квантовой механике». Сб. статей. М., 1954, стр. 106—109.

неточно, так как при локализации гармоничная волна может превратиться в набор гармоничных волн разной частоты, т. е. в шум, если волны из источника гармонических колебаний оборвать через промежуток времени, не слишком превышающий период колебаний. Поэтому резкое стаккато на низких тонах органа плохо звучит [24].

Таким образом, локализация волнового процесса во времени и пространстве влияет на те его свойства, через которые определяются импульсы и энергия частицы.

С помощью принципа дополнительности Бор разъясняет влияние так называемых «приборов» на динамические переменные квантовых систем.

Еще до упомянутых статей Гейзенберга и Бора Дирак ввел понятие «*представлений*» квантовых объектов. Каждое «представление» дает набор точных и однозначных значений некоторой динамической переменной и указывает лишь вероятность определенных значений других переменных. Может существовать «*q*-представление», дающее точные значения координат, и «*p*-представление», дающее точные значения импульсов. Бор интепретирует «представления» Дирака, связывая их с выбором измерительных приборов.

Каждая квантовая система может быть экспериментально определена при помощи различных приборов. Одни приборы сортируют частицы, входящие в изучаемое множество, по их положению. Другая группа приборов сортирует частицы по импульсу. Пусть перед нами система, состоящая из микрочастиц. Можно представить себе группу приборов, измеряющих положение этих частиц в пространстве, сортирующих эти частицы по значениям координат. Таким прибором может служить неподвижная диафрагма со щелями, через которые проходят частицы. Можно, уменьшая просветы щелей, делать подобные измерения все более точными. Эти же приборы позволяют определять с неограниченной точностью динамические переменные, являющиеся функциями координат. Описанная группа приборов соответствует «*q*-представлению».

Можно представить себе другую группу приборов. Они измеряют импульсы частиц. Например, при помощи подвижной диафрагмы, отклоняющейся при толчке, полу-

[24] См. сб. «Вопросы причинности в квантовой механике», стр. 106.

чаемом от проходящего через щель электрона, можно измерить компоненту импульса электрона, используя закон сохранения импульса. Показания этих приборов соответствуют «*p*-представлению».

В теории относительности «представлениями» служат различные системы координат, движущиеся прямолинейно и равномерно (специальная теория относительности) либо с ускорением (общая теория относительности) одна относительно другой. В квантовой механике «представлениями» служат многомерные координатные системы, соответствующие сериям физических процессов, связывающих собственно квантовые процессы с точными, определенными, однозначными изменениями или координат, или составляющих импульса (соответственно или времени, или энергии). Возможно ли представить себе квантовый процесс без той или иной цепи дальнейших процессов, связывающих его либо с *макроскопически регистрируемым* точным изменением координат, либо с таким же изменением импульса (и со статистически определяемым изменением другой, сопряженной переменной)? Иначе говоря, возможно ли *инвариантное* «представление», помимо условно-классических «представлений» Дирака? Этот вопрос, к которому мы уже не раз подходили, останется и сейчас без ответа. Мы вспоминаем о нем вновь и вновь, чтобы проследить стержневую линию, проходящую через историю квантовой механики в течение тридцати лет и, быть может, сейчас приближающуюся к узловому пункту.

К этому вопросу мы вернемся в связи с *современными* (т. е. вставшими во весь рост перед наукой в середине нашего столетия) проблемами теории квантованных полей и элементарных частиц. Но современные проблемы и современные тенденции теоретической физики в некоторой мере окрашивают ретроспективную оценку идей, возникших в 20-е годы, в частности принципа дополнительности, принципа неопределенности и дираковских «представлений».

В 1927 г. собрался очередной, пятый Сольвеевский конгресс физиков, на котором разгорелась оживленная дискуссия по основным проблемам квантовой механики. Здесь впервые применительно к квантовым процессам прозвучало слово «индетерминизм». Группа крупнейших физиков: Бор, Гейзенберг, Шредингер, Борн, Иордан,

Паули, Дирак — говорила о статистических закономерностях как о самых глубоких закономерностях бытия. Связывая с понятием детерминизма старое лапласовское представление, они пришли к тезису об «индетерминизме» микропроцессов. Указанные взгляды были встречены резкой критикой со стороны Лоренца, Ланжевена, Эйнштейна и некоторых других теоретиков. Один из создателей волновой механики де Бройль пытался дать новую интерпретацию волн материи, исключавшую самую постановку вопроса об индетерминизме.

Ланжевен в своем выступлении высказал мысль об условности классического «вопроса» применительно к квантовому объекту.

«Если природа,— говорил впоследствии Ланжевен,— не дает точного ответа на наш вопрос относительно электрона, уподобляемого частице классической механики, то не будет ли слишком большой самонадеянностью сразу заключить, что „природа не знает детерминизма". Не будет ли более правильным сказать, что самая постановка вопроса является неправильной и что электрон вообще не может быть уподоблен частице в понимании классической физики» [25].

Выступая против индетерминизма, Ланжевен отнюдь не восстанавливает единовластия *классического* детерминизма, основанного на одновременном, точном определении координат и составляющих импульса частиц. Он не сводит неопределенность и статистический характер квантовых закономерностей к простому незнанию скрытых динамических закономерностей, одновременно и точно определяющих координаты и импульсы. Ланжевен не склонен успокаивать сторонников абсолютного координатно-импульсного детерминизма, он не говорит им, что дело не так плохо, позади квантовой статистики стоят-де пока неизвестные координатно-импульсные классические закономерности. Ланжевен отрицает абсолютную законность координатно-импульсного, классического вопроса, задаваемого природе в отношении электрона. Конечно, этот вопрос присущ квантовой механике, и, отвечая на него, современная физика накопила множество достоверных сведений о микромире, но — это вытекает из слов Ланжеве-

[25] П. Ланжевен. Избранные произведения. М., 1949, стр. 396—397.

на — может встретиться ситуация, когда условность вопроса окажется существенной.

Сейчас, вспоминая выступление Ланжевена на Сольвеевском конгрессе, мы можем сказать, что физика середины XX в., по-видимому, подошла к пределам даже ограниченного соотношениями неопределенностей уподобления элементарных частиц классическим частицам, иными словами, к пределам квантовой механики, основанной на таком уподоблении.

Классический детерминизм, исходящий из одновременного и абсолютно точного определения координат и составляющих импульса, лежит в основе «классического вопроса», уподобляющего электрон классической частице. На этот вопрос в квантовой механике не может последовать точного ответа. Значит, квантовая механика выражает более общий принцип детерминизма.

Взгляды Эйнштейна на квантовую механику, высказанные на Сольвеевском конгрессе и позже, мы рассмотрим подробнее.

Идея каузальной закономерности — объективного ratio мира — не позволяла Эйнештейну признать неопределенность и статистические закономерности исчерпывающим объяснением реальности. Он не видел путей к примирению вероятностной интерпретации квантовой механики с универсальной детерминированностью природы. Значительно позже, в 1947 г., Эйнштейн писал Борну:

«В наших научных взглядах мы оказались антиподами. Ты веришь в играющего в кости бога, а я — в полную закономерность в мире объективно сущего, что я пытаюсь уловить сугубо спекулятивным образом. Я надеюсь, что кто-нибудь найдет более реалистический путь и, соответственно, более осязаемый фундамент для подобного воззрения, нежели это удалось сделать мне» [26].

Наиболее глубокие закономерности бытия определяют не вероятность событий, а сами события. Но Эйнштейну не удалось ни в 20-е годы, ни позже найти закономерности, которые определили бы события в микромире нестатистическим образом. «Сугубо спекулятивное» доказательство существования таких закономерностей, о котором говорится в письме, не удовлетворяло Эйнштейна. Поэтому он упоминал о субъективной интуиции, которая, конечно,

[26] См. «Усп. физ. наук», т. 59, вып. 1, 1956, стр. 130—131.

не может быть обязательной для других. В том же 1947 г. Эйнштейн опять писал Борну о квантовой механике:

«Мою физическую позицию я не могу для тебя обосновать так, чтобы ты ее признал сколько-нибудь разумной. Конечно, я понимаю, что принципиально статистическая точка зрения, необходимость которой впервые ясно осознана была тобой, содержит значительную долю истины. Однако я не могу в нее серьезно верить потому, что эта теория несовместима с основным положением, что физика должна представлять действительность в пространстве и во времени без мистических дальнодействий. В чем я твердо убежден, так это в том, что в конце концов остановятся на теории, в которой закономерно связанными вещами будут не вероятности, но факты, как это и считалось недавно само собой разумеющимся. В обоснование этого убеждения я могу привести не логические основания, а мой мизинец, как свидетеля, т. е. авторитет, который не внушает доверия за пределами моей кожи» [27].

Выступления Эйнштейна против господствующей интерпретации квантовой механики и ответы — главным образом Нильса Бора — способствовали выяснению вопроса. Но в основном действительный смысл дискуссии стал *более ясным много позже, в связи с обобщением* квантовой механики и теории относительности.

На Сольвеевском конгрессе, критикуя чисто вероятностную трактовку волновой функции, Эйнштейн привел следующий пример.

*Пусть частица, движению которой соответствует плос*кая монохроматическая волна $\psi$, проходит через отверстие в плоском экране. Проходя через отверстие, волна благодаря дифракции становится за экраном расходящейся сферической волной. За плоским экраном с отверстием помещен другой, регистрирующий экран, например фотопленка. Последняя имеет форму полусферы с центром, совпадающим с отверстием в первом экране, т. е. все точки фотопленки находятся на одинаковых расстояниях от отверстия — центра расходящейся волны. Согласно вероятностной интерпретации волновой функции $\psi$, частица попадает на некоторую точку фотопленки с вероятностью, равной квадрату $\psi$ в этой точке. Частица вызовет здесь потемнение пленки. Ни в какой другой точке потемнение

[27] «Усп. физ. наук», т. 59, вып. 1, 1956, стр. 131.

пленки не произойдет, во всех остальных точках попадание частицы исключено ее попаданием в рассматриваемую точку. Значит, как только фотографический эффект, вызванный частицей, произошел, автоматически уменьшаются до нуля вероятности попадания частицы в другие точки.

Почему же эти вероятности до фотографической регистрации частицы на полусферической пленке не были равны нулю? Потому, что мы просто не знали еще действительной, вполне определенной траектории частицы, или потому, что эта траектория объективно, независимо от наших знаний действительно неопределенна, размазанна?

Эйнштейн рассматривает оба возможных ответа с точки зрения пространственно-временно́й связи событий. Если наличие частицы в данный момент в данной точке исключает ее пребывание во всех других точках, значит точка локализована. Появление частицы в этой точке не может мгновенно уничтожить возможность ее пребывания в других точках, если частица не находится в каждый момент времени в определенном пункте пространства. Представим себе, что это так и есть, что частица обладает определенной траекторией, иначе говоря, остановимся на первом из возможных ответов. Тогда неопределенность координаты — чисто субъективное обстоятельство, а статистический характер закономерностей квантовой механики — результат простого незнания некоторых параметров (об этих скрытых параметрах речь впереди). Как только результат действия этих параметров, точно определяющих траекторию частицы, стал известен (благодаря потемнению фотопленки), сразу же отпадает мысль о ненулевой вероятности попадания частицы в другие точки. Эта вероятность была только мыслью, только предположением, только результатом незнания определенной траектории частицы. Такая субъективная версия полностью восстанавливает детерминизм, причем классический детерминизм Лапласа и Лагранжа: материальные точки, составляющие Вселенную, обладают сколь угодно точными значениями координат и сколь угодно точными значениями скоростей, эти значения полностью предопределяют все последующие события, всю последующую судьбу Вселенной.

Второй ответ предполагает объективно-вероятностный характер значений динамических переменных в кванто-

вой механике. Это предположение, как показал Эйнштейн, ведет к крайне парадоксальным выводам. Если статистический характер квантовых закономерностей — объективное свойство движущихся частиц, то частица существует каким-то образом во всем пространстве между плоским экраном и полусферической фотопленкой. Это пространство может измеряться дециметрами — речь идет явным образом о макроскопическом пространстве. Частица присутствует повсюду, но с некоторой вероятностью своей индивидуализации. Бор говорит: «...в конечных областях пространства — времени частицы суть нерезко определенные индивидуальности». Но в своем подчиненном закону сохранения энергии воздействии на фотопленку частица обладает резко очерченной индивидуальностью. Де Бройль называет это «способностью частицы конденсироваться в одной точке, производя в ней эффект, сообразный с каузальными законами сохранения энергии». Так он интерпретирует фразу Бора: «Индивидуальность частицы, выходя из пределов пространственно-временно́го описания, отвечает требованиям причинности» [28].

Эйнштейн полагал, что исчезновение вероятности пребывания частиц во всех иных точках в момент регистрации частицы в одной точке несовместимо с пространственно-временны́м описанием мира.

Что значит в данном случае «пространственно-временно́е описание мира»?

Это выражение можно понимать в смысле объективности пространства и времени. Картина мира, отказывающаяся от такой посылки, перестает быть научной картиной мира. Но под «пространственно-временны́м описанием» можно понимать и нечто другое — описание мира в виде совокупности материальных частиц, центры тяжести которых изменяют положение со временем, т. е. частиц, координаты которых являются функциями времени: $x = f(t)$. Такое описание — наиболее общее определение механики, оно охватывает не только классическую, но и релятивистскую и даже — с ограничениями — квантовую механику. Наличие волновых свойств у элементарных частиц делает неприменимым (применимым с ограничениями) точное механическое описание и связанные с ним по-

[28] Л. де Бройль. Введение в волновую механику. Киев, 1934, стр. 135. Изд. 2. М.: URSS, 2005.

нятия. Если под пространственно-временны́м описанием понимать описание типа $x = f(t)$, то с ним связаны не только координаты, но и другие переменные. Координаты можно дифференцировать по времени, получить скорости, приписав частице массу, получить импульсы и т. д. В этом понимании механическое (в широком смысле) пространственно-временно́е описание мира означает описание с помощью координат, импульсов и других переменных как дифференцируемых функций времени.

В начале 30-х годов споры о детерминизме в квантовой механике приняли несколько иную форму. Нейман в своей книге «Математические основания квантовой механики» [29] исследовал вопрос о возможности иной интерпретации квантовой механики, помимо вероятностной. Могут ли, вообще говоря, средние значения динамических переменных, указываемые в общем случае квантовой механикой, считаться результатом усреднения точных, нестатистических детерминированных значений, зависящих от некоторых еще не известных нам параметров?

В классической статистической физике мы пользуемся средними, потому что не знаем или не нуждаемся в знании скоростей и координат отдельных молекул. Эти параметры определяют не вероятность, а достоверное значение тех же переменных в каждый будущий момент времени. Таким образом, за вероятностными (определяющими вероятность тех или иных определенных значений и средние значения при большом числе измерений) закономерностями макроскопической теории стоят нестатистические закономерности. Может быть, в глубине, за кулисами квантовомеханической сцены, на которой действуют статистические закономерности, стоят неизвестные нам параметры, определяющие для всех состояний точные, достоверные значения координат, импульсов и других динамических переменных? Если это так, то квантовая механика в вероятностной интерпретации представляет собой временный отход от классических идей либо теорию, по существу не противоречащую классической, так же как классическая статистика при всей своей специфичности не противоречит классической механике Ньютона и классическим уравнениям движения.

---

[29] См. И. фон Нейман. Математические основы квантовой механики. М., 1964.

Нейман пишет о скрытых параметрах, которые могут объяснить в духе классической механики связь между волновой функцией и значениями динамических переменных частицы. Он доказывает, что скрытые параметры, каков бы ни был механизм их действия, сделали бы невозможными подтвержденные опытом фундаментальные соотношения квантовой механики. «Ведь если бы наряду с волновой функцией должны были существовать еще и другие фиксирующие состояние параметры («скрытые параметры»), то было бы даже исключено, чтобы те же самые физические величины стояли в тех же самых отношениях друг к другу...».

«Не помогло бы также,— продолжает Нейман,— предположение о том, что, помимо известных изображаемых в квантовой механике с помощью операторов физических величин, существуют и другие величины, до сих пор неизвестные. В самом деле, ведь тогда даже для известных физических величин оказались бы неверными соотношения, взятые из квантовой механики... Таким образом, дело здесь вовсе не в вопросе интерпретации квантовой механики (как нередко считалось). Напротив, квантовая механика должна была бы оказаться объективно ошибочной, чтобы стало возможным другое описание элементарных процессов, отличное от статистического» [30].

Противоречит ли существование параметров, определяющих нестатистическим образом динамические переменные системы в любом состоянии, точным и достоверным утверждениям квантовой механики, получившим практически полное экспериментальное подтверждение?

Нейман доказывает, что скрытые параметры противоречат таким утверждениям. Не будем повторять доказательств. Изложим их основной физический смысл в связи с принципом дополнительности так, как это сделал Гейзенберг в лекции, прочитанной в Венском университете в 1935 г. [31]

Гейзенберг исходит из противопоставления классических понятий и классических систем, с одной стороны, и неклассических, квантовых понятий и систем — с дру-

---

[30] И. фон Нейман. Математические основы квантовой механики. М., 1964, стр. 241.

[31] Русск. пер.: «Принципиальные вопросы современной физики». В кн.: В. Гейзенберг. Философские проблемы атомной физики. ИЛ, 1953, стр. 34—46. Изд. 3. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008.

гой. Основной тезис Гейзенберга — необходимость классического представления квантовых законов, необходимость классических понятий и аналогий для формулировки любых научных утверждений. Гейзенберг говорит: «...хотя законы классической физики кажутся с точки зрения современной физики только предельными случаями более обобщенных и абстрактных взаимосвязей, все же соответствующие этим законам классические понятия остаются неотъемлемой частью естественнонаучного языка, без которого невозможно даже и говорить о научных результатах».

Из неизбежности классических понятий для изложения неклассических законов Гейзенберг выводит окончательный характер статистической интерпретации принципа дополнительности и соотношения неопределенности. Допущение скрытых свойств, координат, параметров «заставило бы нас признать неверными положения квантовой теории как раз в тех пунктах, в которых они дают точные математические предсказания экспериментальных результатов».

Чтобы доказать этот тезис, Гейзенберг уточняет разграничение физического процесса. Одна часть — это объект исследования. Мы, разумеется, можем из цепи связанных друг с другом явлений выбрать определенную часть, определенные звенья, которые нас интересуют. Объективно процессы в ядре (вылет альфа-частицы, ее отражение от дифракционной решетки, приближение к экрану и т. д.) образуют непрерывную цепь. Если нас интересует импульс или положение альфа-частицы, мы выделяем некоторую часть непрерывной цепи физических явлений и считаем ее объектом исследования. События, происходящие в дифракционной решетке и далее, мы уже не изучаем (мы изучаем *с их помощью* предыдущие события), а устройства, где они развертываются, мы должны считать не объектом исследования, а прибором. Это, так сказать, вторая часть физического процесса.

«С помощью более или менее сложных приборов мы задаем вопрос природе, который всегда касается того или иного объективного процесса, происходящего в пространстве и времени»,— пишет Гейзенберг. «Того или иного» — значит, от нас зависит выбор того или иного процесса из числа реальных, объективных процессов, происходящих в природе, от нас зависит вопрос, который мы задаем, но

ответ на этот вопрос, разумеется, определен объективными закономерностями и относится к объективной действительности. «Из такого положения вещей автоматически следует, что при математическом рассмотрении этого процесса мы проводим резкую грань между приборами, рассматриваемыми нами как вспомогательное средство для постановки вопроса и, таким образом, в известном смысле принадлежащими нам самим, и физической системой, о которой мы хотим что-то узнать».

Свободный выбор границ изучаемого объекта не представляет собой чего-то специфического для квантовой механики. Макроскопическая механика, и классическая и релятивистская, пользуется свободным выбором координатных систем для решения той или иной динамической задачи. Такие динамические переменные, как координаты и импульс, как известно, приобретают различные значения в зависимости от системы отсчета, выбранной по произволу, т. е. в зависимости от «вопроса, заданного природе», от характера динамической задачи. Далее классическая (а в более общей и последовательной форме — релятивистская) механика исключает произвол, переходя к инвариантному представлению физических величин и закономерностей. Специфика квантовой механики выражается (повторим: *выражается,* а не *состоит*) в том, что, определив границы неклассического объекта, свойство которого изучается и к которому относится «заданный природе вопрос», мы обнаруживаем глубокое различие между объектом и вопросом: «классический» вопрос (например, об импульсе и положении элементарной частицы) относится к объекту, обладающему неклассической природой. В сущности именно об этом и говорил Ланжевен на Сольвеевском конгрессе. Мы задаем вопросы, *точно* применимые лишь к классическим объектам, и получаем *неточные* ответы. Гейзенберг полагает, что «классические» вопросы неизбежны, что без классических понятий вообще нельзя говорить о научных результатах. К обсуждению этого тезиса мы перейдем несколько позже.

Остановимся на проблеме объекта и прибора. Все различие между ними — в степени точности, с которой мы определяем процессы, протекающие в том и другом. Ядро, из которого вылетает альфа-частица,— объект, дифракционная решетка — прибор. Условность этих понятий видна уже из того, что альфа-распад может быть вызван

искусственно, а дифракционная решетка может быть поверхностью кристалла, естественно выросшего за тысячелетия до нас. Все дело в том, что мы заранее знаем закономерности, управляющие процессами, происходящими в решетке. Мы не изучаем эти закономерности, мы их уже знаем (с той степенью точности, какая необходима для решения задачи), мы стремимся узнать о других звеньях непрерывной физической цепи причин — следствий, например о движении альфа-частицы, о ее положении и импульсе. В квантовой механике мы изучаем дискретный объект при помощи континуальных «тестов» — приборов. Вопрос о дискретности самого прибора вышел бы за рамки той квантовой механики, о которой здесь идет речь.

В классической физике непрерывность пространства (а значит, и импульса) и времени (а значит, и энергии) не противоречила дискретности вещества. В квантовой физике появляется дискретность действия. Квантовые объекты, где эта дискретность существенна, изучаются с помощью приборов, т. е. физических объектов с заранее определенными континуальными свойствами: «$q$-приборов», способных давать любые по точности сведения об одной континуальной величине — координате, и «$p$-приборов», регистрирующих другую континуальную величину — импульс. Кроме того, могут быть «$t$-приборы», определяющие время, и «$E$-приборы», измеряющие энергию.

При изложении общих принципов квантовой механики «приборы» обычно выглядят принципиально точными, допускающими любую точность измерения; вся вина за неточность возлагается на квантовый объект.

В действительности континуально-классический характер «приборов» — возможность любого точного одновременного измерения координат и импульса (времени и энергии) — следует считать простым результатом неточного макроскопического определения природы самого прибора. Представление о дискретности действия по сравнению с классической картиной — более точная картина действительности. Классическая картина — неточное представление, с законным для ряда задач приближением игнорирующее дискретность действия. С таким приближением мы подходим к системам, именуемым «приборами». С более строгими требованиями мы подходим к другим системам — объектам квантовомеханического описания. Переход от менее строгого континуально-классического

критерия к более строгому дискретно-квантовому создает, вообще говоря, неопределенность. Статистическая интерпретация прокладывает мост между двумя критериями, и по этому мосту континуальное представление проникает в область дискретных квантовых объектов. Мы заменяем дискретную картину частиц континуальной картиной вероятности пребывания частиц в точках пространства. Переход от достоверных значений к вероятностям и в классической физике позволил континуализировать атомистическую картину молекулярных движений и создать макроскопическую теорию.

Все сказанное общеизвестно, но об этом нужно было напомнить, чтобы подойти к пунктам действительных разногласий между Нейманом, Гейзенбергом и другими сторонниками господствующей версии, с одной стороны, и их оппонентами в вопросе о скрытых параметрах — с другой.

Гейзенберг рассматривает непрерывную цепь физических явлений и границу, отделяющую звенья, подчиненные классическим закономерностям («прибор»), и звенья, подчиненные квантовым закономерностям («объект»). Там, где проходит граница между ними, появляется неопределенность, происходит неконтролируемое воздействие прибора на объект и законы квантовой механики приобретают статистический характер. «Таким образом,— пишет Гейзенберг,— детерминистическое дополнение квантовой механики имело бы место только на линии разграничения. Но так как детерминирующие новые физические свойства должны быть приписаны только определенной системе, то при удалении из этой системы разграничительной линии возникает неизбежное противоречие между закономерными следствиями из новых свойств и взаимосвязями квантовой теории. Новые физические свойства наблюдаемой системы, которые должны восполнить пробел статистических законов, стали бы теперь, после смещения разграничительной линии, проявляться там, где невозможно никакое дополнение, они приводили бы лишь к нарушению уже существующих однозначных закономерных взаимосвязей».

Гейзенберг иллюстрирует эти соображения тем же примером отражения альфа-частицы от дифракционной решетки. Такое отражение происходит в направлении, определяемом свойствами всей решетки. Зависимость на-

правления отраженных альфа-частиц от всей решетки — многократно проверенный закон квантовой механики. Пусть некий скрытый параметр — некоторое свойство атома радия — дает возможность достоверно предсказать направление альфа-частицы, вылетевшей из атомного ядра. Иначе говоря, прибавив к известным нам свойствам атома еще одно, мы можем обнаружить нестатистическую зависимость направления альфа-частицы от свойств атома. Тогда от этих свойств с полной достоверностью зависит место дифракционной решетки, на которое попадет альфа-частица, и дальнейшая судьба частицы целиком определится свойствами этого места, а не свойствами всей решетки. Это противоречит только что упомянутому закону. Все дело в том, что определенная траектория альфа-частицы понимается в классическом смысле: траектория не зависит от всей решетки. Но как иначе понимать определенность траектории? Определенность траектории теряет смысл, если из нее не вытекает независимость частицы, испущенной атомом радия, от решетки. «В конечном счете мы всегда приходим к тому, что где-нибудь если не для альфа-частицы, то для приборов, применяемых при ее наблюдении, мы без колебаний используем классические понятия».

Таким образом, аргументация Гейзенберга (это относится и к аргументации Неймана) основана на предположении, что классические понятия и аналогии неустранимы. Если понимать неймановский запрет в ограниченном, относительном и конкретном смысле, он не означает ничего, кроме следующего.

Из экспериментально проверенных тезисов квантовой механики, т. е. из ее положений, достоверным и однозначным образом подтвержденных экспериментальной проверкой, вытекает невозможность классического истолкования квантовых закономерностей. Реванш, возврат к классической картине невозможен. При любом классическом представлении квантовых процессов классическая система и квантовая система оказываются подчиненными различным закономерностям, и переход от неклассических закономерностей «объекта» к классическим закономерностям «прибора» неизбежно связан со статистическим характером теории. Это и значит, что закрыта дорога назад, но открыта дорога вперед, что прогресс физики необратим, что развитие физики — это не ряд прагматически оправ-

данных формул, а последовательный и необратимый переход к представлениям, все с большей точностью отражающим действительность, что каждая подлинно крупная и прогрессивная физическая теория (и в том числе квантовая механика) не только сменяется новой теорией, но и вносит в картину мира не окончательные, подлежащие дальнейшему уточнению, но действительные, достоверные, проверенные знания.

С подобной позиции следует рассматривать проблему полноты квантовомеханического описания. Вокруг этой проблемы неоднократно велись дискуссии, в результате которых выяснилась, в частности, связь названной проблемы с проблемой скрытых параметров. Остановимся на одной из таких дискуссий, а именно на двух статьях: одной — Эйнштейна, Подольского и Розена и второй — Бора.

Статья Эйнштейна, Подольского и Розена «Можно ли считать, что квантовомеханическое описание физической реальности является полным?» [32], начинается очень четким тезисом:

«При анализе физической теории необходимо учитывать различие между объективной реальностью, которая не зависит ни от какой теории, и теми физическими понятиями, с которыми оперирует теория».

Далее нужно ответить на собственно *физический* вопрос: какие понятия отображают объективную действительность инвариантным образом и какие понятия требуют дополнительных указаний на условия эксперимента. В теории относительности мы встречаемся с инвариантными понятиями, независимыми от координатной системы, и относительными понятиями, теряющими смысл без указаний на систему отсчета. В квантовой механике основная проблема также заключается в разграничении характеристик микромира, зависящих от характера взаимодействия между микрочастицей и классическим объектом, и характеристик, инвариантных при переходе от одного типа взаимодействия к другому, «дополнительному».

В статье Эйнштейна, Подольского и Розена сформулировано условие полноты физической теории: «...каждый элемент физической реальности должен иметь отражение в физической теории». Следовательно, теория, согласно

[32] См. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen. Phys. Rev., v. 47, 1935, p. 777. Русск. пер.: «Усп. физ. наук», т. 16, 1936, стр. 440.

известной судебной формуле, должна содержать «правду, только правду и *всю правду*». Пожалуй, разумнее было бы ограничиться двумя требованиями, не ждать окончательного ответа о всех элементах физической реальности от каждой теории — этапа на бесконечном пути к абсолютной истине. Но речь сейчас идет о другом: можно ли требовать от физической теории полностью однозначного представления всех элементов реальности.

Понятие квантовомеханического состояния должно выдержать экзамен на звание «полного описания», и экзаменационные требования сформулированы так: «*если мы можем без какого бы то ни было возмущения системы предсказать с достоверностью (т. е. с вероятностью, равной единице) значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине*». Такие элементы реальности, иначе говоря, объективные соотношения, допускающие однозначное достоверное отображение, должны быть полностью учтены физической теорией.

В статье Эйнштейна, Подольского и Розена далее идет анализ квантовомеханического описания поведения частицы с одной степенью свободы с точки зрения высказанного выше критерия реальности и ее полного отображения. Мы последуем за авторами, чтобы, помимо прочего, повторить в самом кратком изложении идеи квантовой механики. Эйнштейн, Подольский и Розен обозначают через $A$ наблюдаемую величину и сопоставленный ей оператор. Состояние движения частицы характеризуется волновой функцией $\psi$. Если $\psi$ — собственная функция, принадлежащая собственному значению $a$ оператора $A$, то $A$ с полной достоверностью имеет значение $a$, когда частица находится в состоянии $\psi$. Тогда, с точки зрения высказанного Эйнштейном, Подольским и Розеном критерия реальности, физической величине $A$ соответствует элемент физической реальности. Если $a$ не является собственным значением $A$, т. е. если $A\psi \neq a\psi$, то в состоянии $\psi$ величине $A$ не соответствует элемент физической реальности.

Вообще, если операторы $A$ и $B$ не коммутируют, соответствующие физические величины не могут быть определены достоверно, причем определение одной величины, возмущая систему, искажает сведения о другой величине. Отсюда, применяя высказанные выше определения элемента физической реальности и полноты описания, Эйн-

штейн, Подольский и Розен делают следующий вывод о некоммутативных величинах: либо они не могут быть одновременно реальными, либо — если они реальны — квантовомеханическое описание неполно.

Эйнштейн, Подольский и Розен стремятся доказать, что предположение о полноте квантовомеханического описания приводит к противоречию. Для этого служит очень остроумная конструкция. Пусть две системы I и II, например две частицы, взаимодействуют в течение времени, протекшего от момента $t = 0$ до момента $t = T$. До момента $t = 0$ их состояния были известны. После $t = T$ взаимодействия уже нет. Уравнение Шредингера позволяет вычислить состояние системы, состоящей из двух частиц, для любого момента $t < T$. Эти состояния описываются функцией $\psi$. Можно ли узнать состояние частиц I и II порознь в моменты времени $t > T$, т. е. после прекращения взаимодействия? Эти состояния нельзя вычислить при помощи уравнения Шредингера, зная состояния в момент взаимодействия, т. е. из состояния объединенной системы I и II. Но мы можем определить импульс и координаты одной из частиц, зная импульс и координаты другой частицы. Это определение относится к периоду, когда частицы не взаимодействуют. Тем не менее значения импульса и координат частицы зависят от того, каким образом мы измеряем состояние другой частицы. Если мы измеряем импульс частицы I и получаем точное значение $p_1$, то такое же точное значение $p_2$ получим для частицы II, а для координаты $x_2$ точное значение в этом случае неопределимо. Если же мы измеряем координату частицы I и получаем ее точное значение $x_1$, то неопределимым оказывается значение $p_2$ импульса частицы II. Одновременное точное определение $p_2$ и $x_2$ невозможно, хотя эксперимент, производившийся над частицей (в общем случае — системой), не влиял на состояние частицы (системы) II. «Мы видим,— пишут Эйнштейн, Подольский и Розен,— что в результате двух различных измерений, произведенных над первой системой, вторая система может оказаться в двух разных состояниях, описываемых различными волновыми функциями. С другой стороны, так как во время измерения эти две системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций над первой системой во второй системе уже не может произойти никаких реальных изменений. Это, конечно, является лишь

другой формулировкой того, что понимается под отсутствием взаимодействия между двумя системами. Таким образом, одной и той же реальности (вторая система после взаимодействия с первой) можно сопоставить две различные волновые функции...» [33]. Следовательно, квантовомеханическое описание неполно, если импульс и координаты частиц одновременно не обладают реальностью в указанном выше смысле. Иначе получается, что измерение, не действующее на реальные элементы, меняет их: реальность координат и импульса частицы ставится в зависимость от измерения, производимого над другой частицей, не взаимодействующей с данной. «Никакое разумное определение реальности, казалось бы, не допускает этого».

Бор опубликовал свой ответ Эйнштейну, Подольскому и Розену под тем же названием: «Можно ли считать, что квантовомеханическое описание физической реальности является полным?» [34] Он начинает с анализа объективных процессов, приводящих к невозможности одновременного измерения некоммутирующих величин. Исходное обстоятельство — дискретность действия. Из дискретности действия вытекает, что в определенных пределах воздействие квантовой системы на прибор не вызывает в приборе изменений непрерывных, неквантовых величин. Между тем именно непрерывный, неквантовый, классический характер прибора позволяет описывать квантовые процессы, пользуясь классическими понятиями. Поэтому взаимодействие квантового объекта с прибором не может быть непрерывным в смысле интенсивно-бесконечного числа определений импульса, сколь угодно мало отличающихся по координатам точек, в которых определяется импульс.

Эта вполне правильная мысль высказана несколько глухо, на нее как бы заранее бросает тень умещающийся в той же фразе заключительный рефрен.

«В самом деле,— пишет Бор,— конечность взаимодействия между объектом и измерительным прибором, обусловленная самим существованием кванта действия, влечет за собой — вследствие невозможности контролировать обратное действие объекта на измерительный прибор (а эта невозможность будет непременно иметь место, если

---

[33] «Усп. физ. наук», т. 16, 1936, стр. 444.

[34] N. Bohr. Phys. Rev., v. 48, 1935, p. 696. Русск., пер. см.: «Усп. физ. наук», т. 16, 1936, стр. 448.

голько прибор удовлетворяет своему назначению) — необходимость окончательного отказа от классического идеала причинности и радикальный пересмотр наших взглядов на проблему физической реальности» [35].

Здесь неясно, идет ли речь о вполне закономерном отказе от «*классического* идеала причинности» с переходом к новому, более широкому, точному, строгому и конкретному неклассическому пониманию причинности, или же об априорном, противоречащем действительному смыслу неклассической физики индетерминизме — отказе от какой бы то ни было причинности. Выражение «классический идеал причинности» двусмысленно. Но, учитывая ряд других высказываний Бора, следует приписать этому выражению первый смысл: классический детерминизм сменяется более общим детерминизмом. Именно такой вывод следует из любого мысленного эксперимента, иллюстрирующего принцип дополнительности.

Бор описывает простой случай прохождения частицы через щель в диафрагме. Дифракция волны, представляющей состояние частицы, изменяет импульс частицы при прохождении через щель. Ширина щели — мера неопределенности $\Delta q$ положения частицы в момент прохождения через щель. Неопределенность импульса $\Delta p$ зависит от обмена количеством движения между частицей и диафрагмой. Если диафрагма жестко связана через подставку с экраном и другими частями прибора (а без этого нельзя определить $q$), то импульс, полученный самой диафрагмой, *неопределим с произвольной точностью*. Если диафрагма движется, можно определить импульс диафрагмы и (на основе принципа сохранения импульса) импульс частицы. Но в этом случае невозможно точное определение $q$. «Такого рода отказ обусловлен в конце концов требованием чисто классического описания измерительного прибора...» [36].

Если регистрировать смещение диафрагмы, ее нужно рассматривать как объект исследования, диафрагма перестает быть измерителем положения, для самой диафрагмы становится существенным соотношение между ее импульсом и положением. Зная импульс диафрагмы до и после прохождения частицы, мы не можем судить о поло-

---

[35] «Усп. физ. наук», т. 16, 1936, стр. 448.
[36] Там же, стр. 450.

жении диафрагмы в момент прохождения. Возьмем диафрагму в тот момент, когда частица уже прошла через щель. Нам известен импульс диафрагмы до прохождения. После этого предоставляется выбор между экспериментами. Можно еще раз измерить ее импульс, тогда мы уже не сможем измерить положение диафрагмы в момент прохождения, так как мы изменим при эксперименте это положение. Можно определить положение, закрепив диафрагму и лишив себя возможности узнать импульс, так как фиксирование диафрагмы изменяет импульс: «С каждой постановкой опыта связан отказ от одной из двух сторон описания физических явлений, эти две стороны будут здесь как бы дополнительными одна к другой, тогда как их сочетание характеризует методы классической физики» [37].

Бор доказывает, что схема Эйнштейна, Подольского и Розена с двумя невзаимодействующими системами не отличается в принципе от описанного эксперимента. Он предлагает рассмотреть жесткую диафрагму с двумя параллельными щелями. Через щели проходят две независимые друг от друга, невзаимодействующие частицы. Их импульсы заранее известны. Измерен также импульс диафрагмы до и после прохождения обеих частиц. Поэтому известны *сумма* составляющих импульсов частиц и *разность* их начальных координат (и то и другое по направлению, перпендикулярному к щелям). Неизвестны пока *разность импульсов и сумма координат*. Эти сопряженные величины мы не можем определить без дальнейших экспериментов. Можно измерить импульс одной частицы. Поскольку нам известна сумма импульсов обеих частиц, тем самым будет с любой точностью определен импульс другой частицы — без какого-либо воздействия на эту другую частицу. Можно измерить координату первой частицы и, зная разность координат, получить любые по точности сведения о положении второй частицы — также без воздействия на нее, без взаимодействия между частицами. Свобода выбора между двумя экспериментами отличается от ситуации, имевшей место при прохождении одной частицы через щель диафрагмы. Измерение координат частицы определяет ее взаимоотношение с неподвижной деталью прибора. Если мы измерили координаты одной частицы, прошедшей

[37] «Усп. физ. наук», т. 16, 1936, стр. 452.

через щели диафрагмы, значит, нам известно не только положение частицы, но и положение диафрагмы относительно подставки. Результаты измерения координат первой частицы остаются определенными, пока диафрагма занимает определенное положение относительно подставки прибора, определяющей систему отсчета. В свою очередь определенное положение диафрагмы позволяет найти определенную координату второй частицы. Неподвижность диафрагмы не допускает определения импульса второй частицы, так как она не позволяет применить закон сохранения импульса к системе, состоящей из диафрагмы и двух частиц. Наоборот, определение импульсов первой частицы не позволяет определить положение диафрагмы, а следовательно, и положение второй частицы.

Отсюда, заключает Бор, критерий физической реальности, выдвинутый Эйнштейном, Подольским и Розеном (отсутствие возмущения системы при достоверном предсказании значения физической величины), содержит двусмысленность. Измерение координат или импульса первой частицы не изменяет импульса и положения второй частицы, но изменяет положение или импульс диафрагмы и тем самым условия, от которых зависит, какая величина может быть достоверно определена и результаты каких последующих измерений могут быть точно предсказаны.

Теперь представим себе более сложные приборы, для характеристики которых наряду с пространственными характеристиками важны измерения времени. Здесь фигурируют не простые щели в диафрагме, а затворы, открывающиеся и закрывающиеся с определенной скоростью, управляемые часовыми механизмами. Когда речь шла о пространственных смещениях диафрагмы, пространственным координатам противостояли, как дополнительные величины, составляющие импульса, канонически сопряженные с координатами. Когда речь идет о часах как классических приборах, с помощью которых изучается микромир, принцип дополнительности относится к канонически сопряженным переменным — энергии и времени. Подобно не поддающемуся учету переносу импульсов при определении координат и неконтролируемым пространственным сдвигам при определении импульса, мы сталкиваемся с невозможностью при определении моментов времени контролировать обмен энергиями и пользоваться законом сохранения энергии и с невозможностью точно опреде-

лить время, когда эксперимент позволяет учитывать энергию.

Таким образом, в полемике с Эйнштейном, Подольским и Розеном Бор излагает и обосновывает разграничение квантового объекта и классического прибора. Граница между ними может быть проведена по-разному, она определяется в каждом случае неприменимостью классических понятий к одной части системы и применимостью их к другой. «Фундаментальная важность различия между объектом и прибором в квантовой теории обусловлена, как мы видели, тем, что для толкования всех измерений в собственном смысле необходимо пользоваться классическими представлениями, несмотря на то, что классическая теория не может сама по себе объяснить те новые закономерности, с которыми мы имеем дело в атомной физике» [38].

*Измерение* динамических переменных квантовомеханической системы — это частный случай *взаимодействия* одной системы, не подчиняющейся классическим закономерностям, с другой, подчиняющейся им. Подобное взаимодействие происходит, вообще говоря, независимо от какой-либо целесообразной сознательной деятельности, от эксперимента, от познания реальности. Оно происходило до возникновения физических лабораторий, до появления человека на Земле, до образования Земли. При прохождении электрона через тонкую щель в естественной преграде всегда имело место изменение импульса электрона. Другое дело, что изменение состояния системы, взаимодействующей с электроном, завися от состояния электрона, может стать методом измерения положения и импульса электрона, и взаимодействующая с электроном системы может играть роль физического прибора.

Такое понимание взаимодействия электрона с «прибором», замена условного понятия измерения более широким и, вообще говоря, объективным понятием взаимодействия имеют существенное значение для правильного понимания квантовой механики. Л. Ландау и Е. Лифшиц различают «квантовый объект» и «классический объект» [39]. Квантовый объект — это электрон, фотон, вообще частица или система частиц, не подчиняющаяся законам класси-

---

[38] «Усп. физ. наук», т. 16, 1936, стр. 456.

[39] Л. Ландау и Е. Лифшиц. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. Изд. 2-е. М., 1963, стр. 15—16.

ческой механики. Классический объект подчиняется классическим закономерностям или, вернее, его функционирование в качестве классического объекта означает допустимость классического приближения — игнорирования квантовых закономерностей. Взаимодействие между квантовым и классическим объектом и представляет область тех явлений, которые описываются соотношением неопределенности. Отсюда своеобразное отношение квантовой механики к классической. Теория относительности — логически замкнутая теория, связанная с классической механикой только как с предельным случаем, когда распространение света можно считать мгновенным. Квантовая механика также переходит в классическую при предельных значениях некоторых переменных. Но, помимо этого, квантовая механика не может быть сформулирована без классических понятий [40]. Это замечание очень важно для характеристики логической структуры квантовой механики, а может быть, и для прогноза о характере будущей теории, призванной сделать то, что оказалось недоступным квантовой механике, созданной в 1924—1927 гг.

Указанное соотношение между квантовой и классической механикой крайне характерно: можно даже сказать, что квантовая механика — это не столько грамматика неклассического языка, сколько словарь для перевода с этого языка на классический с указанием точности перевода. Точный «импульсный» перевод означает неточность одновременного «координатного» перевода и наоборот. Все дело в неполной применимости понятий «импульс» и «координата» к неклассическому объекту [41].

Дальнейшее изложение развития квантовой механики может показать, как создались предпосылки более определенного представления о неклассических параметрах, учет которых ведет не назад, к классической картине мира, а вперед, к более радикальному отказу от классических представлений. Такие предпосылки создавались синтезом квантовых и релятивистских идей.

---

[40] Л. Ландау и Е. Лифшиц. Квантовая механика, нерелятивистская теория. Изд. 2-е. М., 1963, стр. 12.

[41] См. Л. И. Мандельштам. Полное собрание трудов, т. V. М., 1950, стр. 358—359.

## 8. Кванты и относительность

В 1927 г. Дирак [42] построил *релятивистскую* квантовую механику, учитывающую соотношения теории относительности. Эта теория лишена логически замкнутого характера, свойственного нерелятивистской теории, и по существу представляет собой решение частных задач. Наиболее важное историческое значение теории Дирака определяется возможностью ее обобщения, приводящего к новой единой физической картине мира.

Дирак рассматривает уравнение Шредингера и констатирует его нерелятивистский характер. Перенеся в квантовую механику найденные Эйнштейном соотношения между энергией и импульсом движущегося тела, можно изменить уравнение Шредингера таким образом, чтобы оно стало релятивистским — ковариантным при переходах от одной инерциальной системы к другой, т. е. при лоренцовых преобразованиях. Но при этом уравнение разбивается на четыре, и по существу функция $\psi$ разделяется на четыре различные функции: $\psi_1$, $\psi_2$, $\psi_3$, $\psi_4$. Это очень важное обстоятельство. Ведь если такое разделение имеет физический смысл, значит *состояние* электрона может быть различным при одних и тех же значениях независимых переменных функции $\psi$, состояние это четырьмя различными способами зависит от $x$, $y$, $z$ и $t$.

Разделение на *два* уравнения и соответственно на *два* состояния электрона при тех же координатах и в то же время объяснить сравнительно легко. Речь идет о *спине* электрона, т. е. о свойстве, которое сопоставляется (весьма условно — нельзя нарисовать наглядную модель спина) с вращением частицы в одну или другую сторону. Но это еще не объясняет существования *четырех* состояний электрона при одних и тех же значениях независимых переменных волновой функции. Каждое из двух состояний делится еще на два состояния. Это объясняется тем, что в теории относительности выражение для энергии определяет ее квадрат и мы извлекаем корень из этого выражения. Корень может иметь положительный либо отрицательный знак.

---

[42] P. Dirac. Proc. Roy. Soc., v. 114, 1927, p. 243, 710; v. 117, 1928, p. 610; v. 118, 1928, p. 341.

Эта двойственность знака энергии объясняет существование четырех различных функций $\psi$. Каждому из двух состояний, различающихся значением спина, соответствуют два состояния: одно — с положительной, другое — с отрицательной энергией. Тот факт, что релятивистское волновое уравнение электрона автоматически приводит к представлению о двух внутренних состояниях электрона — о спине электрона, находился в полном соответствии с давно ждавшими объяснения экспериментальными данными. Второй вывод — о возможности отрицательных значений энергии электрона — в противоположность первому представлял серьезное затруднение, поскольку существование частицы с отрицательной энергией противоречит всему, что мы знаем о движении частиц.

В 1931 г. Дирак [43] предложил следующий путь устранения отрицательных значений энергии. Он производит перестановку физического смысла понятий «состояние с отрицательной энергией, занятое частицей», и «состояние с отрицательной энергией, не занятое частицей». Дирак меняет смысл этих понятий. Он называет состояние, занятое электроном с отрицательной энергией, «свободным». Оно «свободно» от частицы с отрицательной энергией и может рассматриваться как «дырка» в множестве занятых состояний. Поведение такой «дырки» будет совпадать с поведением частицы с положительной энергией (ведь отсутствие частицы с отрицательной энергией означает увеличение суммы положительных энергий), но «дырка» будет себя вести иначе, чем обычный электрон: в электрическом поле положительного заряда, притягивающего обычные электроны, «дырка» будет отталкиваться, т. е. вести себя как положительный заряд. Отсюда мысль о «дырке» как о частице, ничем не отличающейся от электрона, кроме заряда,— о положительном «антиэлектроне». Такая частица получила название позитрона и в 1932 г. была открыта Андерсоном и независимо от него Блеккетом и Оккиалини в космических лучах. В 1933 г., уже после этого открытия, Дирак, излагая основы своей теории, писал:

«Незанятое состояние отрицательной энергии, или дырка, как мы будем называть его для краткости, будет обладать положительной энергией, так как оно является местом, где имеется недостаток отрицательной энергии.

---

[43] P. Dirac. Proc. Roy. Soc., v. 126, 1931, p. 360.

В самом деле, дырка ведет себя совершенно подобно обычной частице, и, отождествив ее с позитроном, мы наиболее разумным образом избавляемся от трудности, связанной с появлением отрицательных энергий в наших уравнениях» [44].

Аналогичным образом каждой частице соответствует зеркально отображающая ее античастица с теми же свойствами (собственной массой, спином, статистикой), но с противоположным зарядом. В частности, в «антимир» Дирака должен входить антипротон. В цитированной работе Дирак пишет: «Пожалуй, можно было бы предположить, что та же самая теория применима к протонам. Это привело бы к возможности существования отрицательно заряженных протонов, являющихся зеркальным изображением обычных, положительно заряженных. Конечно, отрицательные протоны будет гораздо труднее обнаружить экспериментально, так как для этого необходима значительно бóльшая энергия соответственно большей массе.

Если мы станем на ту точку зрения, что полная симметрия между положительным и отрицательным электрическими зарядами является фундаментальным законом природы, то мы должны рассматривать как своего рода случайность, что Земля и, вероятно, вся солнечная система содержат избыток обычных отрицательных электронов и положительных протонов. Вполне возможно, что некоторые звезды построены иным путем, именно — главным образом из позитронов и отрицательных протонов. Конечно, в мире должно быть одинаковое число звезд каждого сорта. Оба сорта звезд будут иметь в точности одинаковые спектры, и в настоящее время нет возможности различить их какими-либо астрономическими методами».

Далее оказалось, что электроны и позитроны могут аннигилировать, превращаясь в электромагнитное излучение, т. е. в фотоны, и, наоборот, фотоны большой энергии могут превращаться в электронно-позитронные пары.

В этой книге, где речь идет о наиболее крупных физических идеях, стоящих в одном ряду с фундаментальными

---

[44] П. А. М. Дирак. Теория электронов и позитронов. Доклад в Стокгольме в 1933 г. при получении Нобелевской премии. Сб. «Современная квантовая механика» (нобелевские доклады Гейзенберга, Шредингера и Дирака). Л.— М., 1934, стр. 72—73.

обобщениями Галилея и Эйнштейна, мы не будем рассматривать то колоссальное число открытий второй четверти нашего столетия, которое привело к современной картине элементарных частиц и различных по своей природе полей. Дело в том, что в существовании электронно-позитронных пар, способных возникнуть из фотонов и превратиться в фотоны, уже содержатся два понятия, полностью выходящие за рамки картины мира, которая развивалась от Галилея до Эйнштейна.

Первое из них — *трансмутация* элементарных частиц. Об этом понятии уже говорилось во вводном очерке этой книги как об исходном пункте новых ретроспективных оценок, и в следующей главе нам придется вернуться к этому вопросу. Второе понятие, содержавшееся в релятивистской квантовой механике Дирака,— это понятие *вакуума* поля. К нему можно перейти, предварительно остановившись на второй релятивистской квантовой концепции, созданной также Дираком и также в 1927 г.

Еще раньше релятивисткого волнового уравнения Дирак выдвинул новую теорию излучения — квантовую электродинамику [45]. В классической электродинамике напряженность поля в каждой точке могла принимать любые значения. Дирак применяет к теории электромагнитного поля правила квантования, которые дают дискретные значения поля. Электромагнитное поле в пустоте может быть разложено на компоненты согласно теореме Фурье, иными словами, электромагнитное поле рассматривается как результат суперпозиции монохроматических, синусоидальных волн. Возьмем одну из таких компонент электромагнитного поля, некоторую монохроматическую волну. Сравним ее с гармоническим осциллятором. Волна и осциллятор обладают сходными динамическими свойствами. Со времен первых работ Планка по теории квант стало известно, что энергия гармонического осциллятора может принимать лишь дискретные значения — кратные $h\nu$. Если электромагнитное поле состоит из монохроматических волн, сопоставленных с гармоническими осцилляторами, то прежде всего энергия электромагнитного поля квантуется, т. е. принимает дискретные значения, равные $h\nu$,— в этом и состоит теория фотонов, выдвинутая Эйнштейном в 1905 г. В дальнейшем выяснилось, что энергия

[45] См. P. Dirac. Proc. Roy. Soc., v. 114A, 1927, p. 243.

гармоничного линейного осциллятора принимает значения, кратные половине $h\nu$. Осциллятор обладает энергией, равной

$$E_n = h\nu\left(n + \frac{1}{2}\right),$$

и наименьшей энергией, очевидно не исчезающей при $n = 0$:

$$E_0 = \frac{h\nu}{2}.$$

В состояниях с такой наименьшей, но не равной нулю энергией осциллятор имеет конечную амплитуду колебаний. Соответственно и в электромагнитном поле, в состоянии с наименьшей энергией, электромагнитные колебания отличны от нуля. Это состояние с наименьшей энергией означает, что в рассматриваемом пространстве нет фотонов: энергия фотона $h\nu$ больше наименьшей энергии поля. И тем не менее в этом состоянии колебания поля не прекращаются, и если они в среднем дают нулевую величину поля, то средние *квадраты* напряженности поля не обращаются в нуль.

Будем дальше рассматривать картину электромагнитного поля с наименьшей энергией при отсутствии фотонов, когда напряженность поля в среднем равна нулю, так как положительные и отрицательные отклонения при достаточно большом числе уравновешиваются, а квадраты напряженностей, всегда положительные, не исчезают. В среднем поле равно нулю. Но по мере перехода к меньшим объемам мы будем встречать все более заметные отклонения от среднего нулевого значения — нулевые флюктуации поля.

Электромагнитное поле в обычном смысле состоит из фотонов, и там, где нет фотонов,— там нет поля. Мы называем пространство, где нет фотонов, нулевым электромагнитным полем, или *вакуумом электромагнитного поля*. Оно отличается от пустоты, которая фигурировала в атомистических представлениях в качестве «реального небытия», окружающего дискретное «бытие», и отличается от континуальной среды, заполняющей пространство в других концепциях. Вакуум — это пустота в *среднем*, в нем погашаются отдельные колебания, но квадраты амплитуд, всегда положительные, не равны нулю. Вакуум может по-

рождать *реальные* фотоны и может поглощать их. В отсутствие реальных фотонов вакуум включает *виртуальные фотоны.*

Электронно-позитронные пары, о которых уже говорилось в связи с интерпретацией релятивистского волнового уравнения Дирака, можно рассматривать в качестве квантов поля — электронно-позитронного. Тогда множество «нерожденных», виртуальных пар образует вакуум электронно-позитронного поля. Превращение электронно-позитронных пар в фотоны и обратно, как и всякое излучение и поглощение фотонов электронами и позитронами, можно рассматривать как взаимодействие электронно-позитронного и электромагнитного полей.

Отметим одну сторону учения о вакууме, весьма существенную для развития общего представления о частице и окружающей ее среде.

В классической физике частица занимает определенный конечный объем либо нулевой объем (в этом случае частица имеет определенные пространственные координаты). Она взаимодействует с другими частицами. Взаимодействия определяются ее зарядом и массой. В квантовой механике частица приобретает определенные координаты при взаимодействии с классическим объектом.

В картине мира, вырастающей из релятивистской теории электрона, квантовой электродинамики и, вообще, из теории квантованных полей, мы встречаем частицу, которая не взаимодействует с другими тождественными себе «реальными» частицами, а взаимодействует с виртуальными квантами, она испускает и сама же поглощает эти кванты. Такое представление выводит картину мира за рамки простого разграничения классического и квантового объектов. Частица рассматривается не под углом зрения ее взаимодействия с классическим прибором; напротив, в центре внимания оказывается взаимодействие частицы с физическим объектом, который в классическом представлении как бы не существует (поэтому он и называется, «виртуальной» частицей в отличие от «реальной»).

Теория вакуума связана с представлением о взаимодействиях электрона с вакуумом электронно-позитронного поля и с вакуумом электромагнитного поля. Учет таких взаимодействий приводит к очень серьезному затруднению: энергия электрона оказывается бесконечной. Соответственно и масса электрона оказывается бесконечной.

Это физически абсурдный вывод. Если бы электроны обладали бесконечной массой, они не могли бы двигаться.

Бесконечная энергия получается в том случае, когда мы учитываем тот вклад в собственную энергию частицы, например электрона, который вносится виртуальными фотонами, излучаемыми и затем поглощаемыми самой частицей. Чем меньше интервал времени между излучением и поглощением виртуального фотона, тем больше его энергия и его вклад в собственную энергию частицы.

Анализ наметившегося затруднения приводит к следующему выводу: бесконечная энергия получается, если применить соотношения теории относительности ко все меньшим областям пространства и времени и не прекращать это применение на каких-то минимальных расстояниях и интервалах времени. Таким образом, речь идет о примирении, разграничении, быть может, синтезе двух основных идей физики XX столетия — теории относительности и квантовой теории. Наметившиеся здесь пути выходят за рамки истории науки, но характеристика этих путей может служить отправной точкой исторических оценок.

Перенесем вопрос о применимости принципа относительности к бесконечно уменьшающимся (или ограниченным минимальными значениями) пространственно-временны́м областям в следующую главу, которая будет посвящена эпилогу истории физических идей от Галилея до Эйнштейна.

# X. КЛАССИЧЕСКАЯ ФИЗИКА В СВЕТЕ КВАНТОВО-РЕЛЯТИВИСТСКИХ КОНЦЕПЦИЙ

## 1. Дискретность пространства — времени на световом конусе и эпилог классической физики

Анализ тенденций теоретической физики, наметившихся в середине нашего столетия и связанных, в частности, с устранением бесконечных значений энергии и массы, позволяет по-новому оценить основные идеи физики XVII—XX вв. и найти стержневую, сквозную идею, которая модифицировалась от «Диалога» Галилея до новейших квантово-релятивистских концепций и представляет собой пребывающий и сохраняющийся субъект исторических изменений. Поиски исторически инвариантного содержания сменяющих одна другую физических идей — первая задача истории науки. В истории науки, как и во всякой истории, понятие эволюции теряет смысл без указания: *что* собственно эволюционирует.

В чем же состоит позитивная физическая идея, которая принимает различные формы, обобщается и уточняется, но при этом остается тождественной себе, включает нечто исторически инвариантное и превращает сменяющие друг друга физические теории в исторический процесс?

К ответу на поставленный вопрос и подводит нас анализ современных тенденций теоретической физики и переоценка прошлого под углом зрения этих тенденций.

В большом числе новых физических концепций — попыток преодоления бесконечных значений энергии и массы — фигурируют минимальные расстояния и минимальные интервалы времени. Если нельзя представить себе излучение виртуального фотона на расстояние, меньшее, чем некоторая минимальная величина $\rho$, или на время, меньшее, чем $\tau = \rho/c$ (где $c$ — скорость света, т. е. скорость движения фотона), то тем самым при подсчете соб-

ственной энергии электрона обрезаются неограниченно большие энергии — вклад неограниченно малых по расстояниям и времени процессов излучения и поглощения виртуальных фотонов. Естественным кажется обобщение таких попыток — гипотеза дискретности пространства и времени, предположение о минимальных расстояниях, внутри которых пространство неделимо, и минимальных интервалах, внутри которых время далее неделимо.

Идея дискретного пространства и времени очень стара, она встречалась на всех этапах развития физики, а с 30-х годов почти непрерывно поднималась вновь и вновь в различных формах. Обычно минимальное расстояние $\rho$ принималось равным по порядку величины $10^{-13}$ *см*, а минимальное время $\tau$ принималось равным $\rho : c$, т. е. величине порядка $10^{-24}$ *сек*. Однако эта идея не стала основой новой физики потому, что, во-первых, она противоречит релятивистской причинности в ультрамикроскопических областях и, во-вторых, не приводит сама по себе к релятивистской причинности в макроскопических областях. Именно второе из этих оснований служит главным препятствием для построения новой картины мира, исходящей из минимальных, далее неделимых расстояний и временны́х интервалов. Если бы из дискретного пространства и дискретного времени вытекали в качестве макроскопического приближения соотношения теории относительности, мы могли бы говорить о новой системе объяснения природы.

Требование релятивистской причинности состоит в том, чтобы событие $A'$ в мировой точке $x'$, причиной которой служит событие $A$ в мировой точке $x$, было отделено от $A$ *временноподобным* четырехмерным интервалом, т. е. наступало не раньше, чем истечет время, необходимо́е свету, чтобы пройти из $x$ в $x'$. Релятивистская причинность охватывает процессы, протекающие со скоростью, не превышающей скорости света. Если пространство дискретно, то заполняющая элементарный объем $\rho^3$ частица является абсолютно твердым телом. Но в случае абсолютно твердой частицы полученный ею импульс передавался бы на расстояние $\rho$ с бесконечной скоростью. К аналогичному результату приводят и другие попытки физического истолкования дискретности пространства. Таким образом, дискретное пространство противоречит релятивистской причинности и теория дискретного пространства не может быть лоренц-инвариантной.

Подойдем к этому вопросу со стороны критериев «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства».

Теория дискретного пространства согласуется с двумя фундаментальными фактами: конечной собственной энергией и взаимодействием частицы с вакуумом, а также с аналогичными взаимодействиями, приводящими без добавочных гипотез к бесконечным значениям энергии. Дискретность пространства позволяет одновременно объяснить эти фундаментальные факты непротиворечивым образом. Но «внешнее оправдание» дискретного пространства в макроскопической области требует согласования этой гипотезы с релятивистской причинностью.

Что же касается «внутреннего совершенства» гипотезы дискретного пространства, то здесь вопрос сложнее. Дискретность пространства не является предположением, сделанным ad hoc. Такое предположение представляется естественным, и это иллюстрируется историей науки — постоянным появлением идеи дискретности в различные эпохи в связи с самыми различными фактами и обобщениями. Но является ли эта гипотеза *физической?*

Сопоставим идею дискретности пространства с идеей его неэвклидовости. Обе эти идеи возникают весьма естественным образом. Непрерывное эвклидово пространство определяется аксиомой Архимеда (равнозначной утверждению о бесконечной делимости пространства) и постулатом Эвклида. Обобщение, т. е. отказ от того или иного постулата, дает неархимедову геометрию в одном случае и неэвклидову геометрию в другом. Но логическая непротиворечивость неэвклидовой геометрии еще не делает ее *физическим* предположением. Она стала таким предположением, когда Эйнштейн в общей теории относительности показал, что гравитационное поле можно рассматривать как нарушение эвклидовых соотношений. В подобном указании и в принципиальной возможности экспериментальной проверки состоит физическая содержательность неэвклидовой геометрии.

Неархимедова геометрия, основанная на существовании минимального расстояния и кратных ему дискретных значений координат, останется чисто геометрическим и для физики априорным допущением без указания на конкретную физическую интерпретацию перехода от дискретной геометрии к непрерывной и, наоборот, анало-

гично тому, как общая теория относительности интерпретирует переход от эвклидовых соотношений к неэвклидовым.

Можно показать, что разграничение физических эквивалентов дискретной и непрерывной геометрии вытекает из теории относительности при ее естественном обобщении на ультрамикроскопические области.

В теории относительности мы встречаем соотношения, относящиеся к телам, движущимся со скоростью, меньшей, чем скорость света. Это область, находящаяся внутри светового конуса. Далее мы знаем о процессах, протекающих со скоростью света, т. е. о процессах на световом конусе. Чтобы связать процессы внутри светового конуса с процессами на световом конусе, нужно допустить, что частицы, движущиеся макроскопически со скоростями, меньшими скорости света, т. е. частицы с ненулевой массой покоя, могут участвовать в процессах на световом конусе. При некоторых предположениях процессы на световом конусе могут быть основой дискретности пространства — времени как физической закономерности. Предположим, например, что частица с ненулевой массой покоя аннигилирует в некоторой точке и затем через $\tau \sim 10^{-24}$ *сек* испытывает регенерацию в другой точке на расстоянии $\rho \sim 10^{-13}$ *см* и что такие регенерации являются исходными, элементарными событиями, из которых складывается мировая линия частицы [1]. Мы можем отождествить частицу, регенерировавшую в соседней пространственно-временно́й клетке, с аннигилировавшей частицей и таким образом ввести представление о смещении тождественной себе частицы со скоростью $\rho : \tau = c = 3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*, т. е. о ее пребывании на световом конусе. Такие смещения-регенерации и представляют собой поведение частицы с ненулевой массой на световом конусе. Смещения-регенерации образуют ультрамикроскопическую траекторию частицы. Мы сталкиваемся здесь не с дискретностью пространства и не с дискретностью времени, а с дискретностью пространства — времени.

[1] См. Я. И. Френкель. Докл. АН СССР, т. 64, 1949, стр. 507; «Усп. физ. наук», т. 42, вып. 1, 1950, стр. 69; Б. Г. Кузнецов. Об основах квантово-релятивистской логики. Сб. «Логические исследования». М., 1959, стр. 99—112; Принцип относительности в античной, классической и квантовой физике. М., 1959, стр. 211—230; Этюды об Эйнштейне. М., 1965, стр. 144—147.

Макроскопическая траектория $L$ частицы отличается от микроскопической траектории $M$. На последней частица, сохраняя при элементарных смещениях постоянную абсолютную скорость $c$, испытывает случайные блуждания и различные стороны на пространственной гиперплоскости. Макроскопическая скорость частицы зависит от пространственной диссимметрии вероятностей регенераций: при одной и той же вероятности регенераций в любом направлении частица после большого числа случайных блужданий окажется вблизи исходной точки, а при существенной диссимметрии вероятностей вдоль некоторой линии, макроскопическая траектория и макроскопическая скорость на этой линии не будут нулевыми, частица сдвинется, хотя макроскопическая скорость $v$ будет всегда меньше $c$. Таким образом, макроскопическое движение частицы с ненулевой массой будет происходить внутри светового конуса, и здесь пространство — время будет непрерывным, причем такое определение представится физически содержательным.

Из картины сдвигов-регенераций на световом конусе можно вывести не только предельный характер скорости света по отношению ко всем механическим скоростям $v$. Из нее вытекает и сама инвариантность скорости света по отношению к преобразованиям координат. Иллюстрацией такой *принципиальной* возможности может служить следующая схема.

Направление диссимметрии вероятностей сдвигов $\rho$ (т. е. направление, на котором вероятность сдвига в одну сторону больше, чем в противоположную), совпадающее с направлением макроскопической траектории $L$, меняется при переходе от одной системы координат к другой. Меняется и степень диссимметрии $p(\rho_L) - p(\rho_{-L})$, где $\rho_L$ — сдвиг по направлению $L$, а $\rho_{-L}$ — сдвиг в противоположном направлении. Диссимметрию можно «оттрансформировать»: если взять систему координат, где траектория $L$ сожмется в точку, то случайные блуждания будут в среднем за большой срок такими же частыми в одном направлении, как и в противоположном. Очевидно, и вероятности их здесь равны:

$$p(\rho_L) - p(\rho_{-L}) = 0.$$

Перейдем теперь от диссимметрии вероятностей к ее распространению. Здесь речь идет не о сдвигах частицы,

а о перемещении самого соотношения вероятностей. Но если событие обладает лишь вероятностью, то сама вероятность его достоверна — на этом, как мы видели, основан в квантовой механике переход от вероятных значений координат и импульса частицы к достоверным значениям волновой функции $\psi$, по которой можно судить о вероятности динамических переменных частицы. Величина $p(\rho_1) - p(\rho_{-1})$ характеризует каждый сдвиг $\rho$, «игра в кости» разыгрывается на каждом элементарном интервале, каков бы ни был исход «игры».

«Исход игры» выражается в диссимметрии разброса, в длине траектории $L$, соответствующей единице времени, в макроскопической скорости $v$, но сама «игра» переходит с одного отрезка $\rho$ на другой, следующий отрезок со скоростью $\rho/\tau = c$ каков бы ни был ее «исход», иными словами, в какой бы системе мы ни определяли движение частицы, она разыгрывается каждый раз на инвариантном четырехмерном отрезке $\mu$ — элементе макроскопической мировой линии, равном (в случае отсутствия или игнорирования гравитационных полей $\sqrt{3\rho^2 + (ic\tau)^2}$.

Из предельного характера скорости $\rho/\tau = c$ вытекает, как мы знаем, зависимость массы от скорости. Мы можем вывести эту релятивистскую закономерность из соотношения между симметрией случайных блужданий частицы и диссимметризирующим полем.

Чем больше последнее, чем бóльшая преодоленная симметрия случайных блужданий соответствует достигнутой макроскопической скорости $v$ частицы, тем бóльшая интенсивность диссимметризирующего поля нужна для перехода к другому значению $v$, для ускорения частицы. Таким образом, мы может ассоциировать симметрию случайных блужданий, «энтропию» движения частицы, неопределенность ее сдвига с *массой* частицы, пропорциональной скорости $v$, которая выражает диссимметрию сдвигов, «негэнтропию» движения частицы. Можно пойти и дальше, приписав ответственность за диссимметрию вероятностей сдвигов-регенераций локальным полям, а ответственность за симметрию вероятностей — воздействию однородной Метагалактики. Однако нет смысла развивать дальнейшие гипотетические конструкции. Схема дискретного пространства — времени на световом конусе не претендует на что-либо большее, чем на роль иллюстрации возможного включения трансмутационных процессов в чи-

сло исходных процессов, с описания которых начинается построение научной концепции мироздания.

Анализ этой схемы приводит к выводу: трансмутационные процессы сами по себе также мало могут играть роль основных «кирпичей мироздания», как и движения тождественных себе частиц.

Мы приходим к такому выводу, подводя итоги анализа сквозных проблем, проходящих через многовековую историю физики. В числе таких проблем, принимавших новые формы, но никогда не исчезавших, находится характеристика *физических* объектов в их отличии от геометрических объектов. Такое отличие было труднейшей задачей каждой концепции, отказывавшей веществу в качественных отличиях, сводивших эти отличия к форме и величине дискретных тел. Картезианская физика не могла найти различие между *телом* и занятым им *местом;* индивидуализация тела не получалась при отождествлении пространства и вещества. Лейбниц видел эту ахиллесову пяту картезианской физики и наделил вещество динамическими свойствами. Но, чтобы судить о массе тела, нужно знать его поведение, нужно говорить не только о теле, тождественном самому себе в данном месте и в данный момент времени (тривиальная себетождественность), но также о теле, тождественном самому себе в различных пунктах в различное время, о тождественном себе движущемся теле (нетривиальная себетождественность), нужно вводить в определение тела закон, управляющий его движением.

В результате развития атомистических представлений указанная проблема приобрела форму разграничения частицы и мировой точки. *Событие*, т. е. пребывание частицы в мировой точке, не сводится к соединению четырех чисел — пространственно-временны́х координат в один образ, *поведение* частицы не сводится к переходу из одной мировой точки в другую, к определенной форме мировой линии. Мировая точка и мировая линия могут быть чисто мысленными конструкциями, они лишены предиката существования, *экзистенциальной истинности*, без представления о каком-то «некартезианском» процессе, т. е. процессе, не сводимом к пребыванию в мировой точке и к переходу в другую мировую точку.

Предположим, что таким «некартезианским» процессом является элементарная трансмутация частицы, напри-

мер, такая трансмутация, которая происходит в ячейке дискретного пространства — времени, как об этом говорилось выше. Это было бы шагом к трансмутационной картине мира, если бы не очевидная физическая бессодержательность понятия трансмутации, как чисто локального понятия, без макроскопического понятия мировой линии.

В самом деле, что собственно означает фраза: «частица данного типа превратилась в частицу иного типа»? Тип частицы характеризуется определенным видом мировой линии и трансмутация частицы — это переход с одной эвентуальной мировой линии на другую эвентуальную мировую линию.

Таким образом, новая физическая картина вовсе не отбирает у движений тождественных себе частиц титул исходных процессов — «кирпичей мироздания» и не передает этот титул ультрамикроскопическим трансмутациям.

Она связана с более радикальным поворотом, она вообще отказывается от понятия элементарных процессов, от «кирпичей мироздания» и сразу исходит из *дополнительности* макроскопического и ультрамикроскопического аспектов мироздания.

Этот термин *дополнительность* означает воздействие макроскопического определения на ультрамикроскопическое и, наоборот, ультрамикроскопического определения на макроскопическое. Каждый эксперимент, фиксирующий направление данной мировой линии в данной мировой точке, связан с вариацией мировой линии, следовательно, с иными предикатами тождественной себе частицы, следовательно, с трансмутацией. Каждая попытка определить пространственно-временну́ю локализацию частицы связана со сдвигом, с переходом в иную мировую точку.

Из приведенных построений, чисто гипотетических, иллюстрирующих не столько современные физические теории, сколько историко-научные констатации, следует, что сквозная идея развития физики — идея однородности и непрерывности пространства — времени, быть может, окажется некоторой аппроксимацией. Она неустранима из картины мира, но является дополнительным аспектом по отношению к другому аспекту — к представлению о дискретных трансмутационных процессах в ультрамикроскопических пространственно-временны́х областях. Когда физическая идея представляется нам некоторой аппрок-

симацией, сразу же вступает в свои права историко-научный анализ. Он должен показать, при каких условиях идея оказалась закономерным приближением к объективной действительности, а в этом — исходный пункт других собственно исторических оценок. Именно для того, чтобы показать принципиальную возможность исторической ретроспекции по отношению к идее однородности пространства — времени, нам и понадобилась изложенная выше условная гипотетическая схема дискретности движения частицы с ненулевой массой на световом конусе и его непрерывности при скоростях, меньших, чем скорость света.

Теперь мы можем увидеть сквозную, неисчезающую и вместе с тем доступную исторической ретроспекции физическую идею, которая модифицировалась от Галилея до Эйнштейна. Это идея *однородности* — сначала однородности пространства, затем времени, затем пространства — времени и, наконец, макроскопически аппроксимированного пространства — времени. Такая эволюция и лежит в основе истории физических идей XVII—XX вв. Сейчас мы можем с этой точки зрения вернуться к указанным идеям, в частности, к классическим понятиям инерции и силы, к принципам сохранения и необратимости и посмотреть, какую форму они приняли в наше время. Речь идет о некотором эпилоге классической физики, напоминающем распространенную когда-то манеру заканчивать длительное повествование картиной современной жизни героев.

## 2. Однородность пространства

В 1918 г. Эмма Неттер [2] показала, что инвариантности некоторой величины относительно определенной группы преобразований, т. е. однородности данного многообразия, соответствует особый закон сохранения. Однородность многообразия выражается в том, что какая-то величина остается инвариантной при переходе в данном многообразии от одной системы отсчета к другой. Представим себе, что многообразие, о котором идет речь,— это трехмерное пространство. При движении в пространстве, т. е. при изменении пространственных координат, знакомая нам уже функция Лагранжа остается неизменной. Из неизменно-

[2] См. E. Noether. Gött. Nachr., 1918, S. 235

сти этой функции следует, что в системе, которую она характеризует, внутренние процессы не зависят от изменения координат, что изменение координат не сказывается в поведении тел внутри системы, описываемой функцией Лагранжа. Такая неизменность поведения приводит к тому, что по отношению к данной системе составляющие скорости входящих в систему тел не меняются. Соответственно не меняются составляющие импульса.

Сейчас мы можем сказать: современная наука, современная физическая картина мира, появилась вместе с идеей однородности пространства, хотя этот термин и не прозвучал в XVII в. Утверждение это нетривиально в следующем отношении. В первой главе этой книги говорилось, что у Галилея равноценные пространственные точки, иначе говоря точки, различие которых (и переход от одной точки к другой) не сказывается на ходе внутренних процессов в переместившейся системе, образуют кривую линию или, в общем случае, сферическую поверхность. В этом отношении Галилей, как мы видели, не отказался от аристотелевой концепции.

У Аристотеля — вернее, уже в доаристотелевой науке — пространство стало изотропным; с идеей абсолютного верха и абсолютного низа было покончено вместе с образом плоской Земли. Но Земля оказалась в центре пространства, т. е. в выделенной, неравноценной по отношению к другим, особой точке, различные тела получили свои «естественные места» (т. е. опять-таки места, не равноценные другим) на различных расстояниях от Земли. Равноценными у Аристотеля являются равноудаленные от Земли точки, и однородным пространством оказывается поверхность каждой из аристотелевых сфер. Все это, разумеется, требует оговорки, которая уже была сделана в первой главе: речь идет не о понятиях однородности и кривизны пространства — их в древности не было,— а об адресованных будущему *вопросах* античной науки.

Напомним то, что было сказано в начале книги: у Галилея не было представления о «естественных местах», в различной степени удаленных от Солнца. Но в позитивной форме однородность пространства приписывается *круговым* орбитам планет. Почему Земля движется по орбите? Галилей ссылается на инерцию и отказывается рассматривать в качестве причины такого движения независимую

от инерции вторую составляющую орбитального движения. Все то, что Галилей говорит в «Диалоге» о движении тела, предоставленного самому себе, обосновывает движение планет по круговым орбитам. Можем ли мы связать с такой концепцией инерционного движения понятие однородного пространства?

Ответ на подобный вопрос может быть дан лишь в связи с общей теорией относительности. Указанная теория обобщает понятие однородности на искривленное пространство. Тело, движущееся по геодезической линии, подчиняется обобщенному принципу инерции; мы его рассматриваем как предоставленное самому себе и подчиняющееся геометрическим соотношениям *данного* пространства, а тяготение рассматриваем как свойство пространства — отклонение от эвклидовой метрики, т. е. искривление. С подобной точки зрения принцип космической инерции является аналогом идеи однородности искривленного пространства. Подчеркнем еще раз: здесь нет никакого «предвосхищения» общей теории относительности, просто мы еще раз убеждаемся в том, что мировоззрение Галилея — подлинная интродукция классической физики, в ней сплетаются, переходят один в другой еще не окрепшие, не дифференцированные мотивы, которые потом зазвучат отчетливее и создадут уже подлинную классическую полифонию. Но мы можем узнать эти мотивы в их зачаточной и недифференцированной форме только после знакомства с законченной симфонией.

Первой выделилась из первоначальной, нерасчлененной концепции мысль о прямолинейном и равномерном инерционном движении. Декарт, приписав предоставленному себе телу прямолинейную траекторию, перешел к историческому прообразу идеи «плоского» однородного пространства. Движение по инерции было при этом объявлено неизменным состоянием, а изменения были отнесены за счет взаимодействий между телами. Рассмотрим эту идею Декарта в исторической ретроспекции.

Если видеть в физических идеях прошлого *ответы* на появившиеся в науке вопросы, то прямолинейное инерционное движение резко отличается от криволинейной инерции галилеева «Диалога». Концепция круговых равномерных движений не находила того, что Эйнштейн называл «внешним оправданием». Схема Галилея противоречит бесспорному существованию тяготения, бесспорной эллип-

тической форме орбит и бесспорным ускорением планет на орбитах. Концепция Декарта и выросшая на основе понятия прямолинейного инерционного движения классическая механика в общем соответствуют сумме известных фактов. Разграничение прямолинейного инерционного движения и искривлений, вызванных силовыми полями, подтверждено множеством фактов. Общая теория относительности, т. е. синтез понятия инерции и понятия силового (гравитационного) поля, обладала по сравнению с классическим представлением бо́льшим «внутренним совершенством».

Если рассматривать физические идеи прошлого как *вопросы, адресованные будущему*, то картезианская концепция прямолинейного инерционного движения оказывается звеном непрерывного исторического развития, связанным с идеями Галилея. У Галилея, как и у Аристотеля, нерешенная, адресованная будущему проблема движения состояла в эпитете «совершенное», присвоенном круговому движению. В чем смысл этого эпитета? У Декарта, как мы видели, понятие «совершенства» кругового движения было замечено наибольшей простотой прямого движения; Декарт говорил, что прямая линия определяется уже в начальной точке, а кривая требует дополнительных условий. По существу это изменение взгляда на движение предоставленного самому себе тела связано с дифференциальным представлением: прямая определяется условиями в бесконечно малой области, причем в конечной области эти условия не меняются. Но мы можем перенести всю эту схему на кривые пространства — в этом и состоит смысл известной нам уже процедуры ковариантного дифференцирования. Поэтому геодезические линии, фигурирующие в общей теории относительности, являются естественным обобщением прямых, по которым движутся предоставленные самим себе тела. «Совершенные» круговые орбиты Галилея, «простейшие» прямые Декарта и геодезические линии общей теории относительности представляют собой три все более рациональные формы ответа на один и тот же вопрос о движении тела.

Здесь есть еще одно звено. В XIX в. прямую, по которой движется предоставленное себе тело, начали рассматривать как частный случай движения тела в заданном поле. Движение определяется минимальной величиной действия. В современной физике все чаще связывают

наименьшее действие с *наибольшей вероятностью мировой линии*[3]. Эта тенденция позволит (а может быть, уже позволяет — для исторической ретроспекции достаточно принципиальной возможности подобного сближения понятий) с новой точки зрения взглянуть на проблему макроскопического движения в целом.

Концепция прямолинейного инерционного движения достигла своего относительного завершения, когда вихри Декарта сменились историческими прообразами понятий силового поля, когда Ньютон ввел феноменологическое представление о взаимодействии отдаленных тел, зависящем от их расстояния, и были сформулированы основные тезисы классической картины мира: 1) поведение тел в отсутствие других взаимодействующих с ними тел определяется свойствами пространства и, поскольку «плоское» пространство однородно и изотропно, поведение невзаимодействующих тел сводится к покою или прямолинейному движению с неизменной скоростью; 2) все собственно физические, т. е. не сводимые к свойствам пространства, процессы — изменения физических состояний тел — объясняются взаимодействием тел, зависящим от их положения и движения (это и есть то, что Эйнштейн назвал «принципом Маха»).

## 3. Однородность времени

Основные идеи классической физики — однородность плоского пространства (обобщение первого закона Ньютона) и «принцип Маха» (обобщение второго закона Ньютона) — сохранились вплоть до общей теории относительности и развития идеи поля в XX в. (однородность искривленного пространства и взгляд на пространство как на нечто, участвующее во взаимодействии тел). Но они безраздельно царили лишь в тех чисто механических моделях, в которых не было места изменениям во времени, не зависимым от смещения в пространстве. Когда процессы повы-

---

[3] См. R. Feynman. Rev. Mod. Phys., v. 20, 1948, p. 367. Русск пер. в сб. «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955 стр. 167—207; R. Feynman. Phys. Rev., v. 76, 1949, p. 749, 769. Русск. пер. в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики». М., 1954, стр. 138—204; Б. Г. Кузнецов. Об основе квантово-релятивистской логики. Сб. «Логические исследования». М., 1959, стр. 99—112.

шения и понижения температуры тел оказались в центре внимания физики и когда выяснилось, что при описании таких процессов нет ни нужды, ни возможности учитывать смещения отдельных частиц, появилось понятие внутренней энергии покоящейся системы и изменения состояния системы во времени. И раньше, в пределах механики как таковой, применялось понятие энергии, и именно энергия тела характеризовала его поведение от одного мгновения к другому, так же как импульс характеризовал поведение тела от одной пространственной точки к другой. Но две меры движения относились к одному и тому же процессу — в простейшем случае к переходу частицы от ее пребывания в одной пространственной точке в один момент к пребыванию в другой точке в другой момент. Связь смещения во времени со смещением в пространстве — основа *тривиального* четырехмерного представления — приводила к тому, что импульс (точнее, количество движения) и энергия фигурировали в качестве двух величин, измеряющих один и тот же процесс.

Энгельс первый заметил, что энергия является мерой движения, переходящего из простой формы механического перемещения в более сложные формы [4]. Развитие термодинамики показало, что энергия действительно является мерой не только происходящего во времени пространственного смещения тел, но и процессов, сводимых лишь статистически к движению частиц и происходящих в покоящихся системах, т. е. процессов, к которым непосредственно неприменимо понятие импульса.

Для движения материальной точки две меры неотделимы именно потому, что пространство и время неотделимы друг от друга (речь идет о «классическом идеале» науки, которому противоречит мгновенное распространение силы, отрывающее пространство от времени). Пространство однородно, и, согласно классическому принципу относительности, можно с помощью преобразования Галилея «оттрансформировать» пространственное смещение. Тогда мы из сохранения импульса получим сохранение энергии, т. е. лейбницевой меры движения, и наоборот. Эта мысль была высказана Гюйгенсом. Последний исходил из классического принципа относительности. Смысл

[4] См. К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, 2-е изд., т. 20. М., 1961, стр. 391—422.

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 [5].

В системе, состоящей из соударяющихся частиц с массами $m_i$, скорости частиц $\mathbf{u}_i$ переходят после соударений 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 сама 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

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

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, если

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

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

[5] См. В. Паули. Законы сохранения в теории относительности и в атомной физике. Доклад в университете им. Н. Д. Зелинского «Современные проблемы физико-химии и химической технологии». Сборник II. М., 1938, стр. 22.

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 некоторых функций $f(u)$ 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 удовлетворяет 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

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

где $c$ — скорость света.

Однако законы сохранения энергии и импульса в теории относительности претерпевают существенное изменение: они сливаются в единый закон. Три составляющие импульса и скалярное значение энергии связываются в один четырехмерный вектор энергии — импульса, и соответственно теория относительности приходит к единому закону сохранения. Это естественный результат объединения времени и пространства в одном четырехмерном представлении. Мы к нему перейдем несколько позже, а сейчас остановимся на том обобщении физики XIX в., которое было связано с демонстрацией необратимости статистических процессов.

## 4. Анизотропность времени

Первое начало термодинамики указывает на однородность времени. Второе начало — на его анизотропность: направление, в котором время возрастает, и обратное направление физически не равноценны, ход физических процессов необратим. Теория относительности и квантовая механика внесли некоторые новые идеи в содержание этого принципа, найденного в XIX в.

Термодинамика Вселенной как целого, развившаяся в 30—40-е годы нашего столетия, преемственно связана с флюктуационно-космической теорией Больцмана, но исходит из релятивистской космологии, созданной работа-

ми Эйнштейна (1917 г.), А. А. Фридмана (1922 г.) и рядом других работ, появившихся в 20-е годы. В 30-е 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 к Вселенной в целом.

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 флюктуаций, нарушающих равновесие в сверхгалактических масштабах. Но бесконечная Вселенная, какой ее рисует теория Больцмана, не претерпевает монотонной необратимой эволюции и, как уже говорилось, течение времени в ней не является анизотропным. Бесконечная Вселенная не знает тепловой смерти потому, что она в целом не знает «тепловой жизни», не знает переходов от одного состояния Вселенной в целом 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 флюктуаций — развивающихся необратимых процессов, сопровождающихся возрастанием энтропии, и предшествующих им обратных процессов — служит уравновешенная в целом Вселенная. Гигантские межгалактические флюктуации так же мало могут нарушить ее равновесие, как флюктуации, 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. Новейшие представления о необратимой эволюции космоса

связаны с квантовой механикой и взаимодействиями элементарных частиц. Они не будут здесь рассматриваться. Отметим только, что в квантовой механике появилось представление о вероятности мировой линии частицы, которое *может стать исходным пунктом* фундаментального обобщения принципа необратимости физических процессов и анизотропии времени.

## 5. Однородность пространства — времени

Специальная теория относительности приводит к единому закону сохранения трех пространственных компонент (образующих трехмерный вектор импульса) и четвертой временно́й компоненты (скалярной величины — энергии) четырехмерного вектора энергии-импульса. Об этом уже говорилось, и слияние принципов однородности пространства и однородности времени в единый принцип однородности пространственно-временно́го континуума представляется ясным. Речь идет, это следует подчеркнуть, об однородности «плоского», неискривленного, псевдоэвклидова пространственно-временно́го континуума.

Значительно сложнее формулируется *однородность искривленного пространства — времени*, т. е. содержание общей теории относительности.

В общей теории относительности Эйнштейна наряду с уравнением, связывающим тензор кривизны пространства — времени с тензором энергии-импульса, существуют четыре *тождества*, физический смысл которых очень трудно разъяснить без того, чтобы написать самые тождества и связанные с ними другие, многочисленные и сложные математические выражения. Все же можно попытаться сделать это.

В уравнении гравитационного поля Эйнштейна слева стоит тензор кривизны, десять компонент которого показывают, как изменяется в данной точке направление каждого вектора, т. е. его скалярные составляющие в зависимости от кривизны, характеризующей каждое направление пространства — времени. Справа находятся десять компонент энергии-импульса. Но помимо связи между энергией-импульсом и кривизной должны быть описаны некоторые общие, независимые от кривизны свойства пространства — времени — их однородность, позволяющая переходить от одной системы пространственно-временны́х

координат к другой. Компоненты тензора кривизны не зависят от такого перехода; они тождественны, в каких бы системах их ни ориентировали. Поэтому речь и идет о математических тождествах, вытекающих из самого способа, которым были составлены компоненты тензора кривизны.

Общая теория относительности не ограничивается таким аспектом и показывает далее, что указанным тождествам соответствуют уравнения, имеющие определенный физический смысл.

Пока мы говорим о компонентах тензора кривизны, достаточно показать, что они тождественны, в каких бы четырехмерных координатах мы ни измеряли кривизну пространства — времени. Это простые тождества, и их вид зависит от математических приемов составления тензора кривизны. Но перейдем теперь к тензору энергии-импульса. Четырем тождествам, относящимся к кривизне и выражающим однородность пространства — времени, здесь соответствуют четыре *закона сохранения*, относящиеся к энергии и импульсу.

Почему геометрические отображения этих физических законов оказываются простыми тождествами?

Пространство — время обладает двумя разрядами свойств. Первый разряд включает инвариантные свойства, измеряемые математическими величинами, не требующими указания на тело отсчета и в этом смысле абсолютными. Для них характерно *слияние* четырех измерений пространственно-временно́го мира, их неотделимость. Примером таких свойств служит метрика. Переходя от дифференциалов четырех координат к четырехмерному интервалу, мы как бы сплавляем относительные, требующие указания на тело отсчета величины в единую четырехмерную абсолютную величину.

Кривизна — инвариантное, «слитно-четырехмерное» свойство пространственно-временно́го мира. Когда мы получили меру кривизны, исходя из раздельных характеристик пространства и времени, из дифференциалов координат, в выражение для кривизны проникли «координатные» сведения, зависящие от системы отсчета, «лишние» для инвариантного, «слитного» четырехмерного представления, соответствующие «раздельным» относительным свойствам пространства и времени. Их устраняют при помощи четырех тождеств, указывающих на тождествен-

ность кривизны в разных системах координат. Для кривизны — инвариантного свойства — эти тождества остаются простыми тождествами, чисто математическими соотношениями. «Раздельный» пространственный и временной характер указанных четырех соотношений делает их чисто математическими, когда речь идет о «слитных» четырехмерных свойствах в данном случае о кривизне.

Иное дело тензор энергии-импульса. Здесь «раздельные» свойства пространства и времени (однородность того и другого), выражающиеся в четырех соотношениях, имеют физический смысл, являются физическими законами. Однородность пространства выражается тремя скалярными уравнениями сохранения компонент импульса. Однородность времени выражается уравнением сохранения энергии.

Четыре уравнения сохранения входят, таким образом, в теорию тяготения. Почему основные законы, объединяющие не только явления тяготения, но все физические явления: механические, электромагнитные и внутриядерные,— связаны с тяготением? Напомним, что закон тяготения в общей теории относительности представляет собой характеристику связи между *всеми* средоточиями вещества и полями, с одной стороны, и свойствами окружающего пространства и времени — с другой. Из этого закона выводятся законы поведения средоточий масс во времени и в пространстве и, в первую очередь, закон сохранения импульса, связанный с однородностью пространства, и закон сохранения энергии, связанный с однородностью времени. Общая теория относительности рассматривает законы сохранения как четыре (по числу измерений пространства — времени) аспекта единой, абсолютной, инвариантной, четырехмерной кривизны мира.

Если сохранение компонент импульса и сохранение энергии — физические эквиваленты соотношений между компонентами тензора кривизны, то каков же физический эквивалент самой кривизны как инвариантного свойства четырехмерного мира? Кривизна — основное геометрическое свойство пространственно-временного континуума, делающее его *физическим* континуумом и лежащее в основе физической геометрии. Физический эквивалент кривизны — основное физическое свойство вещества, выражающее искривляющую пространство — время функцию вещества. Это *действие* — энергия, умноженная на время.

Действие — мера основного *четырехмерного* свойства вещества. Оно так же относится к четырехмерному миру, как энергия — к трехмерному пространству [6]. Если нарисовать картину усредненного непрерывного распределения материи в пространстве, то основной локальной величиной будет плотность массы, а основной величиной, характеризующей конечные области,— масса или энергия (плотность энергии, умноженная на пространственный трехмерный объем). Если же характеризовать распределение и поведение вещества в четырехмерном мире, то основной величиной будет произведение плотности энергии на четырехмерный объем — действие.

Когда теорию относительности рассматривают как четырехмерную физическую картину мира, то на первый план выступает действие — физический эквивалент кривизны пространства — времени. Этот аспект имеет первостепенное значение и для истории теории относительности. Генезис и развитие понятия действия и вариационных принципов в классической физике и их роль в теории относительности показывают корни последней, соединяющие ее с физикой XIX в. Эддингтон прав, когда говорит, что действие и энтропия — единственные классические понятия, сохранившиеся в релятивистской физике без принципиальных ограничений [7].

Сделаем еще несколько замечаний о смысле и значении принципа наименьшего действия в связи с теорией относительности. Теория относительности позволила исчерпывающим образом разъяснить одну существенную, многократно обсуждавшуюся сторону этого принципа [8]. 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

[6] См. А. Эддингтон. Пространство, время и тяготение. Одесса, 1923, стр. 148—149. Изд. 3. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2010.

[7] «Теория относительности бросала свою тень вперед уже при своем приближении, и физические знания уже тогда имели тенденцию объединяться около двух великих обобщений — принципа наименьшего действия и второго закона термодинамики, или принципа максимума энтропии» (А. Эддингтон. Пространство, время и тяготение, стр. 149).

[8] См. М. Планк. Физические очерки. М., 1925, стр. 95—96.

к другой инерциальной системе, иными словами, инвариантно относительно преобразований Лоренца. В этом выражается четырехмерная природа гамильтонова действия. Четырехмерные пространственно-временны́е «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 временну́ю 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 [9].

---

[9] См. М. Планк. Физические очерки, стр. 50.

Теория относительности интерпретирует принцип наименьшего действия применительно к четырехмерному миру пространственно-временны́х событий как принцип, позволяющий отличить действительные мировые линии от возможных. Поскольку действие — это мера кривизны четырехмерного мира, наименьшее действие означает, что действительные мировые линии совпадают с линиями наименьшей кривизны — геодезическими линиями.

Попытка более глубокого синтеза квантовых и релятивистских идей и атомистического обоснования относительности наталкивает на мысль о статистическом характере принципа наименьшего действия — наименьшей кривизны. Напомним — об этом говорилось в связи с теорией Вейля (см. стр. 402—403),— что Эддингтон в 1920 г. упомянул о весьма интересной интерпретации понятия действия, как функции, независимой от величины масштабных единиц. 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 осуществляющегося движения. Квантовая механика сделала подобные соображения более перспективными.

У Гамильтона формулировка принципа наименьшего действия была тесно связана с оптико-механической аналогией. 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.

В последующем развитии квантовой механики дискретность действия оставалась ее исходным допущением. Эта дискретность, позволив объяснить соотношение квантовой механики, сама по себе не находила объяснения и, таким образом, играла роль предельного понятия теории. Дискретность действия может получить каузальное истолкование при дальнейшем обобщении релятивистской квантовой теории. Попытки такого обобщения, по-видимому, приведут к некоторой новой интерпретации самого поня-

тия действия. Не исключено, быть может, представление о действии, деленном на постоянную Планка, как о числе пространственно-временны́х клеток, в которых происходят трансмутационные процессы на световом конусе,— клеток, которые в макроскопической аппроксимации можно рассматривать в виде непрерывной мировой линии тождественной себе элементарной частицы. Тогда вероятность мировой линии связывается с действием так, как говорил Эддингтон: принцип наименьшего действия становится принципом наибольшей вероятности. В этом направлении идут, как нам кажется, некоторые попытки статистического истолкования теории относительности и, с другой стороны, попытки ввести в квантовую механику понятие *вероятности мировой линии.* Из числа первых упомянем работы Дирака [10], из вторых — диссертацию Фейнмана «Принцип наименьшего действия в квантовой механике» [11]. Идея Фейнмана — определить действительные мировые линии частиц как наиболее вероятные мировые линии — привела его впоследствии к частичному отказу от дифференциального представления движения от точки к точке и от мгновения к мгновению и к замене такого представления интегральным, когда сразу рассматривается движение на некотором конечном участке. По существу и здесь фигурирует минимальная четырехмерная область, внутри которой отказываются разграничивать отдельные мировые точки.

Таковы проступающие сквозь современные тенденции науки неясные и колеблющиеся контуры эпилога классических идей *однородности* пространства — времени и анизотропности времени. Последняя становится характеристикой не только термодинамических (в самом широком и обобщенном смысле) процессов, но и всех процессов изменения структуры микромира и космоса.

Чем дальше наука уходит от классических идей как положительных ответов, тем ближе к ней оказывается

---

[10] См. P. Dirac. Natur., v. 168, 1951, p. 906; Canad. J. Math., v. 3, 1951, p. 1; Proc. Roy. Soc., v. A-209, 1951, p. 291; v. A-212, 1952, p. 330; Physica, v. 19, 1952, p. 888; Naturwiss. Rundschau, v. 6, 1953, S. 441.

[11] См. R. Feynman. The principle of least action in quantum mechanics. Ph. D. thesis. Princeton, 1942. Rev. Mod. Phys. v. 20, 1948, p. 367. Русск. пер. в сб. «Вопросы причинности в квантовой механике», стр. 167—207.

классическая наука как совокупность вопросов и антиномий, как «драма идей», которую Эйнштейн считал объектом истории науки, тем ближе ей «дух Фауста» классической науки, дух бесконечных поисков все более сложных закономерностей природы, бесконечной не только в пространстве и во времени, но и в неисчерпаемой сложности своих законов.

## 6. Ретроспективная оценка теории относительности и квантовой механики

В параграфе, посвященном мировоззрению Эйнштейна, говорилось, что создатель теории относительности, усваивая и перерабатывая традиции рационализма, восходил от XVIII столетия, претендовавшего на окончательное решение загадок бытия, к более гибким идеям XVII в. Это восхождение к истокам рационализма было другой стороной иногда интуитивного, иногда четко сформулированного предвидения дальнейшей, быть может бесконечной, модификации идей, к которым пришел Эйнштейн. Ему был близок XVII век с его глубоким ощущением зари новой картины мира, потому что Эйнштейн в своих собственных обобщениях видел только зарю, только начало новой физики.

В 1955 г., незадолго до смерти, Эйнштейн писал Максу Лауэ, что не может приехать на торжества по поводу пятидесятилетия теории относительности.

«Старость и болезнь делают мой приезд невозможным и, признаться, я благодарен судьбе: все, что связано с личным культом, мне всегда было крайне неприятно. В данном случае речь идет о развитии мысли, в котором участвовали многие и которое далеко не закончено... Если долгие поиски меня чему-либо научили, то их итог таков: мы гораздо дальше от понимания элементарных процессов, чем полагает большая часть современников (тебя я не включаю), и шумные торжества не соответствуют современной ситуации» [12].

Для Эйнштейна покоряющая достоверность теории относительности, достоверность, которую он понимал больше, чем кто бы то ни было, не закрывала нерешенных

[12] K. Seelig. Albert Einstein. Leben und Werk eines Genies unserer Zeit. Zürich, 1960, S. 396—397.

проблем. Такой проблемой было выведение соотношений теории относительности из более общих законов природы. Эти более общие законы должны объяснить не только макроскопические соотношения, постулируемые теорией относительности, но и атомистическую структуру мироздания. Теория относительности утверждает, что в движущихся системах масштабы и показания часов изменяются определенным образом, гарантирующим неизменность скорости света. Но чем определяется поведение масштабов и часов? Для теории относительности их поведение — исходный постулат, подтверждаемый опытом. Однако наука не мирится с чисто эмпирическими данными как последними звеньями анализа и ищет каузального объяснения эмпирических констант — в этом и состоит бесконечная эволюция науки. В автобиографическом очерке 1949 г. Эйнштейн пишет о теории относительности:

«Можно заметить, что теория вводит (помимо четырехмерного пространства) два рода физических предметов, а именно: 1) масштабы и часы, 2) все остальное, например электромагнитное поле, материальную точку и т. д. Это в известном смысле не логично; собственно говоря, теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомную структуру и движутся), а не считать ее независимой от них» [13].

Но такое выведение релятивистских соотношений из атомистической структуры масштабов и часов означает проникновение квантовых понятий в область, где теория относительности ищет свое обоснование. Гейзенберг отметил это в статье «Замечания к эйнштейновскому наброску единой теории поля» [14], где дана новая, отличающаяся от традиционных для 30—40-х годов оценка этой теории. В своей статье Гейзенберг говорит, что с точки зрения квантовой физики масштабы и часы — сложные тела. «Они построены, вообще говоря, из многих элементарных частиц, на них сложным образом воздействуют различные силовые поля, и поэтому непонятно, почему именно их поведение должно описываться особенно простым законом».

---

[13] Эйнштейн. Физика и реальность. Сб. статей. М., 1965, стр. 153.

[14] См. сб. «Эйнштейн и развитие физико-математической мысли». М., 1962, стр. 63.

Но ведь и в самой квантовой физике фигурируют тела, атомистическая и квантовая природа которых принципиально игнорируется. Мы вскоре перейдем к этой фундаментальной предпосылке квантовой механики. До этого следует вернуться к характерному для современной теоретической физики «программированию» новой физической теории, которая должна непротиворечивым образом, с соблюдением требований «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства» устранить расходимости собственной энергии и заряда, а также другие апории современной теории квантованных полей.

Конкретные варианты такой теории не могут пока претендовать на что-либо большее, чем доказательство принципиальной выполнимости тех или иных замыслов. Но некоторые общие прогнозы кажутся весьма правдоподобными, почти однозначными. К ним, например, относятся соображения Ф. Дайсона [15] о двух картинах мира, из которых одна соответствует гамильтоновым уравнениям — анализу физических процессов от мгновения к мгновению, а вторая — более точному анализу. Первую картину увидит наблюдатель, пользующийся приборами, не состоящими из атомов, вернее, наблюдатель, имеющий основание игнорировать атомистическую структуру приборов. Точность измерений, которые он производит, ограничена двумя постоянными — скоростью света и элементарным квантом действия. Такого наблюдателя Дайсон называет «идеальным». Идеальный наблюдатель не сталкивается с взаимодействием полей и соответственным переходом частицы одного типа (кванта одного поля) в частицу другого типа (в квант другого поля). Он может определить напряженность отдельного поля, не возмущенного взаимодействием с другим полем. Отсюда — возможность сколь угодно точного определения одной переменной, при условии неопределенности сопряженной переменной.

Наблюдатель, которого Дайсон именует «реальным», не может игнорировать атомистическую структуру своих приборов. Поэтому он не в состоянии определить с неограниченной точностью даже отдельную переменную частицы. Перед ним раскрываются взаимодействия полей, и это исключает определение напряженности данного поля, не

[15] См. F. Dyson. Phys. Rev., v. 75, 1949, p. 1736. Русск. пер. в сб. «Новейшее развитие квантовой электродинамики». М., 1954, стр. 257—258.

возмущенного взаимодействием. Помимо постоянной Планка и скорости света реальному наблюдателю приходится считаться с другими величинами — константами связи и значениями масс частиц.

Мы встречаем в теории относительности Эйнштейна тезисы, прямо относящиеся к этим константам, существенным для «реального наблюдателя». В теории относительности есть утверждения, определяющие вид мировых линий тождественных себе частиц. Во всех случаях, когда скорость движущейся частицы сопоставима со скоростью света, приходится учитывать изменение масштабов и показаний часов при переходе от одной системы отсчета к другой. Но в случае очень высоких энергий мы сталкиваемся с иными, уже не релятивистскими, а ультрарелятивистскими эффектами.

Теперь мы можем подойти с исторической оценкой к квантовой механике: взглянуть, как выглядит в свете трансмутационного представления характерная для нерелятивистской квантовой механики концепция причинности.

Мы уже знаем, что квантовая механика отказалась от старого лапласовского детерминизма неизмеримо радикальнее, чем классическая термодинамика. Последняя только игнорирует в определенных пределах движение отдельных частиц и разрешает себе оперировать статистическими закономерностями при описании поведения больших ансамблей. Квантовая механика не оставляет лапласовскому детерминизму места даже за кулисами. Статистически определено уже не только поведение больших ансамблей частиц, но и состояние отдельных частиц.

Но отход от системы абсолютно точных динамических закономерностей был не таким радикальным, как это казалось раньше. Квантовая механика теряет смысл без понятий классической механики, неопределенность динамических переменных теряет смысл без состояний определенности, возможность перехода от одного дираковского «представления» к другому теряет смысл без самого понятия «представления», т. е. ряда точных значений одной из сопряженных переменных. Квантовая вероятность теряет смысл без указания определенного и достоверного состояния, которое может обладать той или иной степенью вероятности. В чем же состоят достоверным образом определенные события, вероятность которых соответству-

ет в общем случае волновой функции $\psi$? Они образуют определенную *пространственно-временну́ю* картину, которой соответствуют величины, определяющие пространство, время и отношение бесконечно малого отрезка пространства к бесконечно малому отрезку времени. Пользуясь релятивистскими понятиями, можно сказать: речь идет об определенных мировых линиях.

Такое представление означает, что в основе картины мира лежит перемещение тождественных себе объектов, т. е. аристотелевское $\phi o \rho \alpha'$. Перемещение означает пребывание частицы в последовательных точках пространства в последовательные моменты времени. При точно определенной скорости можно говорить лишь о вероятности пребывания частицы в каждой точке ее траектории. Но речь идет о вероятности *пребывания,* т. е. о пространственно-временно́й картине. В основе картины мира по-прежнему лежат аристотелевские $\phi o \rho \alpha'$, но определены лишь вероятности описывающих $\phi o \rho \alpha'$ величин. Ответ Бора на вопрос об основных закономерностях мира был совершенно отчетливым: в основе мироздания лежат статистические закономерности микромира: «бог играет в кости». Этот ответ был физически содержательным, он подтверждался большим числом наблюдений и в принципе мог быть проверен наблюдениями во всех случаях.

Ответ Эйнштейна не был однозначным, потому что он был негативным: «бог не играет в кости», статистические закономерности, определяющие вероятность определенных значений динамических переменных, не являются исходными закономерностями мира. Значит ли это, что существуют закономерности, точным и достоверным образом определяющие во всех точках количественные характеристики аристотелевского $\phi o \rho \alpha'$? Иными словами, означает ли ответ Эйнштейна признание скрытых точных значений динамических переменных? Или ответ Эйнштейна означает нечто совсем иное: за статистическим определением динамических переменных стоят закономерности совсем иных процессов, не сводящихся к $\phi o \rho \alpha'$, процессов, которые вообще не могут быть описаны значениями координат и скорости?

В годы, когда впервые развернулись дискуссии об отношении квантовой механики к принципу причинности, второй ответ не мог еще облечься в конкретную форму физической теории. Релятивистская квантовая механика

появилась в конце 20-х годов, понятие трансмутации — еще позже и, что самое главное, релятивистская квантовая теория оставалась логически не замкнутой, она решала сравнительно частные задачи, не получала последовательной релятивистской формы, приводила к тяжелым апориям. Второй ответ и сейчас *еще* не может облечься в форму *однозначной* теории, но сейчас гипотетические физические схемы *уже* демонстрируют принципиальную возможность его конкретной физической расшифровки.

Поэтому сейчас дискуссии конца 20-х годов кажутся если не архаичными, то, во всяком случае, достоянием истории. В конце 20-х годов да и позже в центре внимания находились процессы, при описании которых можно было игнорировать квантово-релятивистские эффекты взаимодействия полей и трансмутации частиц. Только эти процессы и получали объяснение в рамках относительно законченной теории, каковой является нерелятивистская квантовая механика. Позиция Бора в споре с Эйнштейном была физически весьма конкретной, потому что она опиралась на такую законченную теорию, но она не выходила за рамки этой теории. Позиция Эйнштейна была чисто интуитивной, но интуиция оказалась обращенной в будущее. Уже в конце 20-х годов можно было сказать, что статистический детерминизм не колеблет общего принципа причинности. Но сейчас можно представить себе более общую форму детерминизма и вместе с тем увидеть действительный смысл различных интерпретаций нерелятивистской квантовой механики.

В истории современной науки с XVII в. до наших дней физическим эквивалентом развивающегося принципа причинности был ряд различных законов сохранения. Этим законам соответствовали различные концепции однородности: однородности пространства, однородности времени, однородности плоского, а затем и искривленного пространства — времени.

Отсюда следует историческая преемственность *всей* современной физики от Галилея до самых новейших тенденций физической мысли, существование сквозной идеи — субъекта исторических модификаций. Поскольку указанные тенденции в известном смысле воплощают гениальную интуицию Эйнштейна, мы имеем основание говорить об идее однородности как о сквозной идее развития физики от Галилея до Эйнштейна.

# ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ


Абрагам М. 327, 358
Авогадро А. 265
Агрикола 12
Альберт Саксонский 79
Ампер А.-М. 289, 309—311, 314, 315
Андерсон К. 475
Аристотель 17, 18, 30, 35, 37, 38, 47, 54, 55, 57, 61—63, 78, 118, 158, 159, 186, 219, 490, 492
Арно А. 58, 59
Архимед 64, 123, 483

Баур К. 230
Бейль А. 119
Бекман 125
Беллармино Р. 45
Бельтра́ми Е. 393
Бентли Р. 135, 138, 154
Бергман П. 403
Бернулли Д. 220, 226
Бернулли И. 219, 220
Био Ж.-Б. 315
Блеккет П.-М.-С. 475
Бойль Р. 138, 153, 157
Больцман Л. 238, 239, 249, 260, 275—283, 498, 499
Бор Н. 7, 323, 411—414, 417, 420, 421, 428, 430, 434, 442, 444; 447—452, 455, 456, 465, 468, 470—472, 510, 511
Борелли Дж.-А. 128
Борн М. 394, 424, 433, 434—433, 450—455
Браге Т. 25, 31
Бройль Л. 414, 415, 417, 419, 420, 421, 422, 423
Бруно Дж. 17, 23, 24, 43, 63, 119, 137
Бэкон Ф. 138

Вагнер Р. 156
Валлис Дж. 219
Вариньон П. 219
Вебер В.-Э. 303, 309, 311
Вейль Г. 399, 400, 402, 403
Вергилий 20
Вивиани В. 71
Вин В. 405, 406, 409
Винер Н. 435
Вольтер Ф.-М.-А. 219
Вольф Х. 185
Врен Х. 17, 90, 181, 195, 208

Галилей Г. 20, 21, 28, 32—88, 104—106, 113, 133, 137, 138, 140, 141, 144, 156—159, 175, 219, 246, 259, 322, 362, 378—380, 476, 477, 481, 482, 489—495, 511
Гамильтон У.-Р. 207, 211, 213, 214, 217, 417, 428, 503—505
Гассенди П. 183, 187
Гаусс К.-Ф. 215
Гегель Г.-В.-Ф. 194
Гейзенберг В. 7, 417, 424, 431—435, 442—452, 460—464, 476, 507
Гей-Люссак Ж.-Л. 224, 242
Гельмгольц Г. 129, 206, 214, 217, 246—249, 324, 376
Гёте И.-В. 186, 192—194
Гиббс Дж.-У. 249, 283, 284
Гильберт Д. 26
Гиппарх 18

Голицын Б. Б. 406, 409
Гоффман Б. 382
Грассман Г.-Г. 204
Грегори Д. 151
Громер И. 382
Гроссман М. 360
Гук Р. 148, 149, 177
Гюйгенс Х. 104, 119, 122—127, 157, 175, 177, 218, 219, 221, 246, 295, 297, 426, 494, 495—497
Гюнтер П. 422

Да Винчи Леонардо 81
Дайсон Ф.-Дж. 508
Д'Аламбер Г. 122, 165, 201, 222, 399
Дальтон Дж. 265
Дарвин Ч. 258
Де Бройль Л. 414—426, 429—435, 450, 453, 457
Девиссон 423
Декарт Р. 37, 53, 65, 85—132, 135, 137, 142, 144, 153, 155, 183, 184, 194, 199, 200, 218, 259, 378, 491, 492, 493
Демокрит 118, 182
Джермер Л.-А. 423
Джинс Дж.-Х. 405, 406, 409
Джоуль Дж.-П. 228, 241—243
Дирак П. 424, 434, 452, 474—479, 505
Дошлер Х. 298—300, 396
Дроз А. 129
Дроз П. 129
Дэви Г. 224
Дэвиссон К. 423
Дюлонг П.-Л. 224
Дюэм П. 311

Жорес Ж. 186
Зелиг К. 341, 508
Зелигер О. 390
Зелинский Н. Д. 496
Зубов В. П. 3

Инфельд Л. 382
Иоанн Дамаскин 142
Иордан П. 424, 433—435, 452

Кавендиш Г. 287
Калуза Т. 403
Кант И. 187, 188
Капица П. Л. 434
Карно Сади 224—227, 232, 236, 249, 257—269
Келли Г. 204
Кирхгоф Г.-Р. 405
Кирхер 39
Клапейрон Б.-П.-Э. 226, 236
Клаузиус Р. 239, 249, 260, 264—272
Клейн Ф. 204, 311
Кольдинг Л.-А. 243
Коперник Н. 17—27, 30, 31, 41—47, 54, 61, 63, 66, 67, 72, 99, 158, 181
Кориалис Г.-Г. 219
Котс Р. 95, 135, 138, 140, 153, 181, 195
Коттлер Ф. 360
Коши О.-Л. 207
Кравец Т. П. 304
Крёнит А.-К. 265
Кристоффель Э.-Б. 374—376, 378—380, 399
Крылов А. Н. 138
Кузнецов Б. Г. 55, 485, 494
Кулон Ш.-О. 287—288
Кювье Ж. 106

Лагранж Ж.-Л. 52, 195, 202—207, 211—213, 215, 217, 247, 248, 306, 313, 320, 456, 490—491, 502
Ландау Л. Д. 472
Ланжевен П. 453, 454, 461
Ламе Г. 309
Лаплас П.-С. 188, 189, 308, 313, 390, 425, 429, 456
Лауэ М. 506
Леверье У.-Ж.-Ж. 178
Леви-Чивита Т. 373
Лейбниц Г.-В. 51, 137, 179, 183—186, 208, 218—219, 221, 222, 245, 247, 294, 487
Ленин В. И. 328, 329
Леруа Г. 194
Линней К. 133
Лифшиц Е. М. 472
Лобачевский Н. И. 310, 380, 391, 393
Локк Дж. 119, 194
Ломоносов М. В. 186, 187, 233
Лоренц Г.-А. 200, 321—322, 325—326, 340, 341, 344, 347, 348, 353, 362, 369, 411, 412, 453, 503
Лорини Н. 47
Люксембург Р. 193
Лютер М. 21, 22

Майер Р. 225—239, 241—243, 245, 248, 264, 266
Майкельсон А.-А. 336, 338
Максвелл Дж.-К. 154, 200, 238—239, 249, 272—275, 282, 286, 290, 304—321, 325, 330, 382, 411, 412, 417
Мандельштам Л. И. 473
Маркс К. 133, 185, 194, 218, 222, 271, 495
Мах Э. 162, 330—332, 387, 494
Медичи Козимо 44
Мейерсон Э. 229, 242, 243, 257, 332
Меланхтон Ф. 21, 22
Мерсенн М. 120
Мёссбауэр Р. 387
Миканцио Ф. 69
Минковский Г. 40, 350—353, 362
Мольер Ж.-Б. 37, 89
Мопертюи А. 336
Муратов А. 192

Нейман Ф.-Э. 309, 311
Нейман И. 458, 459
Нейман К. 390
Нернст В. 285
Неттер Э. 489
Николь П. 88, 89
Нобл. Г.-Р. 336
Ньютон И. 8, 17, 18, 27, 34, 35, 52, 53, 59, 64, 69, 95, 120, 121, 127, 133—183, 186, 187, 190, 191, 194, 195, 203, 208, 218, 219, 233, 258, 295, 361, 362, 379, 380, 383, 385, 386, 389, 401, 422, 458, 493

Оккиалини Дж.-П.-С. 475
Ольшки Л. 37
Осиандер А. 22, 23, 46, 67
Остроградский М. В. 213, 217

Паскаль Б. 89, 90
Паули В. 452, 496
Планк М. 214, 219, 226, 236, 249, 250—255, 279, 285, 297, 320, 404, 406, 408—410, 422, 434, 444, 450, 477, 503—505
Плюккер Ю. 204
Поггендорф И.-Х. 231
Подольский Б. 465—472
Пойнтинг Дж.-Г. 319
Понселе Ж.-В. 221
Пристли Дж. 287
Пти А.-Т. 224
Птолемей 17, 18, 20, 27
Пуанкаре А. 279, 280, 311—313, 339—341, 353
Пуассон С.-Д. 309, 389, 390
Релей Дж. 405, 406, 409
Рише Ж. 123
Розен Н. 465—472
Рудольф П. 31
Румфорд Б. 223, 224, 295

Савар Ф. 315
Ситтер В. 395—397
Слайфер В.-М. 396
Смит Ад. 180
Смолуховский М. 281
Соловин М. 335, 341
Спиноза Б. 119, 137, 330
Стокс Дж.-Г. 297, 298
Стоней Дж. 324

Тартаковский П. С. 423
Тейлор Р. 290, 292
Толанд Дж. 119
Толмен Р.-С. 499
Томсон В. 154, 249, 251, 260, 264, 265, 267, 270, 271
Томсон Г.-Л. 423
Томсон Дж.-Дж. 324, 325, 327
Торричелли Э. 71
Троутон Ф.-Т. 336

Умов Н. А. 250, 319
Урбан VIII 47, 67

Фарадей М. 154, 200, 286—295, 304, 309, 310, 314—316, 324
Ферма П. 208, 417, 418, 426, 428
Физо И. 302, 337
Фок В. А. 381, 382
Фоскарини П.-А. 46
Франк Ф. 407
Френель А. 296—298, 302, 326
Френкель Я. И. 485
Фридман А. А. 393, 396, 397, 400, 498
Фурье Ж.-Б. 267, 416, 417, 432, 478

Хаббл Е.-П. 396, 397

Цермело Э. 279, 280

Чези Ф. 69

Шарлье К.-В.-Л. 389
Шейнер Х. 138
Шиллер Ф. 190, 193
Шпольский Э. В. 443, 448
Шредингер Э. 417, 423—435, 438, 452, 474—476

Эвклид 391, 394, 483
Эддингтон А. 403
Эйлер Л. 207, 209, 210, 220, 295

Эйнштейн А. 7, 8, 32, 59, 140, 162, 258, 279, 281, 283, 303, 322, 329—335, 339—343, 345, 352, 357—362, 372, 374, 378, 379, 381—391, 394—403, 407—410, 421, 422, 450, 453—457, 465—474, 476, 477, 478, 481, 484, 485, 489, 491, 492, 494, 498, 499, 500, 507—509, 510, 511
Эльзассер В.-М. 422
Энгельс Ф. 16, 133, 185, 194, 218, 222, 250, 251, 271, 494
Эпикур 154
Эпинус Ф.-У.-Т. 287
Эренфест П. 440

Юм Д. 330
Юнг Р. 221, 224, 295, 296, 438

Якоби К.-Г. 212—217

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . . 3

**Гелиоцентризм и начало механической картины мира** . . . . . 9

1. Наука XVII в. и ее исторические истоки . . . . 9
2. Коперник . . . . . 17
3. Кеплер . . . . . 24
4. Мировоззрение Галилея . . . . . 33
5. «Диалог о двух системах мира» . . . . . 42
6. «Беседы и математические доказательства» . . . 72

**I. Кинетизм** . . . . . 84

1. Исходные идеи картезианской физики . . . . . 84
2. Картезианская теория движения . . . . . 95
3. Учение о веществе . . . . . 108
4. Эфир . . . . . 117
5. Картезианская физиология . . . . . 128

**III. Динамизм** . . . . . 133

1. Физика принципов . . . . . 133
2. Учение Ньютона об эфире и веществе . . . . . 145
3. Учение о пространстве и движении . . . . . 155
4. Закон всемирного тяготения . . . . . 168
5. Динамизм и атомистика . . . . . 182

**IV. Аналитическая механика и принцип наименьшего действия** . . . . . 190
1. Наука XVIII—XIX вв. . . . . 190
2. Уравнения Лагранжа . . . . . 202
3. Принцип наименьшего действия у Мопертюи и Эйлера . . . . . 207
4. Принцип наименьшего действия в аналитической механике Лагранжа . . . . . 210
5. Принцип Гамильтона и его развитие . . . . . 211

**V. Сохранение энергии** . . . . . 217
1. Развитие понятий живой силы, работы и энергии в механике . . . . . 217
2. Идея сохранения и учение о теплоте . . . . . 222
3. Работы Майера, их содержание и историческое значение . . . . . 228
4. Термодинамика и механика . . . . . 237
5. Определение энергии и трактовка принципа сохранения у Планка . . . . . 250

**VI. Необратимость** . . . . . 257
1. Сади Карно и принцип необратимости . . . . . 257
2. Понятие энтропии у Вильяма Томсона и Клаузиуса 264
3. Термодинамические идеи Максвелла . . . . . 272
4. Теория Больцмана . . . . . 275

**VII. Близкодействие** . . . . . 286
1. Фарадей и идея реальности поля . . . . . 286
2. Оптика и эфир . . . . . 294
3. Метод Максвелла . . . . . 304
4. Уравнения электромагнитного поля . . . . . 314
5. Электродинамика движущихся сред . . . . . 319

**VIII. Относительность** . . . . . 323
1. Электромагнитная картина мира . . . . . 323
2. Мировоззрение Эйнштейна . . . . . 329
3. Постоянство скорости света . . . . . 335
4. Четырехмерный мир . . . . . 348
5. Принцип эквивалентности . . . . . 356

347

**517**

6. Преобразования и инварианты . . . . . 362
7. Кривизна четырехмерного мира . . . . . 372
8. Тяготение . . . . . 377
9. Проверка общей теории относительности . . . . . 382
10. Мир как целое . . . . . 388
11. Единая теория поля . . . . . 399

**IX. Кванты** . . . . . 404

1. Дискретность электромагнитного поля . . . . . 404
2. Модель атома . . . . . 411
3. Волны де Бройля . . . . . 414
4. Уравнение Шредингера . . . . . 423
5. Матрицы и операторы . . . . . 430
6. Волны вероятности . . . . . 437
7. Неопределенность и дополнительность . . . . . 441
8. Кванты и относительность . . . . . 474

**X. Классическая физика в свете квантово-релятивистских концепций** . . . . . 481

1. Дискретность пространства — времени на световом конусе и эпилог классической физики . . . . . 481
2. Однородность пространства . . . . . 489
3. Однородность времени . . . . . 493
4. Анизотропность времени . . . . . 497
5. Однородность пространства — времени . . . . . 499
6. Ретроспективная оценка теории относительности и квантовой механики . . . . . 506

Именной указатель . . . . . 512

URSS.ru URSS.ru URSS.ru URSS.ru

## Другие книги нашего издательства:

URSS

История физики

*Горобец Б. С.* **Круг Ландау: Жизнь гения.**
*Горобец Б. С.* **Круг Ландау: Физика войны и мира.**
*Горобец Б. С.* **Круг Ландау и Лифшица.**
*Горобец Б. С.* **Секретные физики из Атомного проекта СССР: Семья Лейпунских.**
*Хайтун С. Д.* **История парадокса Гиббса.**
*Абрамов А. И.* **История ядерной физики.**
*Богуш А. А.* **Очерки по истории физики микромира.**
*Милантьев В. П.* **История возникновения квантовой механики и развитие представлений об атоме.**
*Бетяев С. К.* **Записки гидродинамика.**
*Тимошенко С. П.* **История науки о сопротивлении материалов.**
*Кадомцев С. Б.* **Геометрия Лобачевского и физика.**

Серия «Синергетика: от прошлого к будущему»

*Пенроуз Р.* **НОВЫЙ УМ КОРОЛЯ. О компьютерах, мышлении и законах физики.**
*Майнцер К.* **Сложносистемное мышление: Материя, разум, человечество.**
*Хакен Г.* **Информация и самоорганизация.**
*Малинецкий Г. Г.* **Математические основы синергетики.**
*Малинецкий Г. Г.* (ред.) **Будущее России в зеркале синергетики.**
*Малинецкий Г. Г.* (ред.) **Синергетика: Исследования и технологии.**
*Трубецков Д. И.* **Введение в синергетику.** В 2 кн.: **Колебания и волны; Хаос и структуры.**
*Арнольд В. И.* **Теория катастроф.**
*Безручко Б. П. и др.* **Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях.**
*Данилов Ю. А.* **Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение.**
*Князева Е. Н., Курдюмов С. П.* **Основания синергетики.** Кн. 1, 2.
*Анищенко В. С.* **Знакомство с нелинейной динамикой.**
*Анищенко В. С.* **Сложные колебания в простых системах.**
*Олемской А. И.* **Синергетика сложных систем: Феноменология и статистическая теория.**
*Чернавский Д. С.* **Синергетика и информация (динамическая теория информации).**
*Баранцев Р. Г.* **Синергетика в современном естествознании.**
*Пригожин И., Стенгерс И.* **Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени.**
*Пригожин И., Стенгерс И.* **Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой.**
*Пригожин И., Николис Г.* **Познание сложного. Введение.**

**Тел./факс:**
**(499) 135-42-46,**
**(499) 135-42-16,**
**E-mail:**
**URSS@URSS.ru**
**http://URSS.ru**

**Наши книги можно приобрести в магазинах:**

**«Библио-Глобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6. Тел. (495) 625-2457)**
**«Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (495) 203-8242)**
**«Молодая гвардия» (м. Полянка, ул. Б. Полянка, 28. Тел. (495) 238-5001, 780-3370)**
**«Дом научно-технической книги» (Ленинский пр-т, 40. Тел. (495) 137-6019)**
**«Дом книги на Ладожской» (м. Бауманская, ул. Ладожская, 8, стр. 1. Тел. 267-0302)**
**«Гнозис» (м. Университет, 1 гум. корпус МГУ, комн. 141. Тел. (495) 939-4713)**
**«У Кентавра» (РГГУ) (м. Новослободская, ул. Чаянова, 15. Тел. (499) 973-4301)**
**«СПб. дом книги» (Невский пр., 28. Тел. (812) 448-2355)**

URSS.ru URSS.ru URSS.ru URSS.ru

URSS.ru URSS.ru URSS.ru URSS.ru

## Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Наше издательство специализируется на выпуске научной и учебной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. Мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.

URSS

Среди вышедших и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

*Кузнецов Б. Г.* **История философии для физиков и математиков.**
*Кузнецов Б. Г.* **Беседы о теории относительности.**
*Кузнецов Б. Г.* **Ценность познания. Очерки современной теории науки.**
*Кузнецов Б. Г.* **Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии.**
*Кузнецов Б. Г.* **Принцип дополнительности.**
*Дорфман Я. Г.* **Всемирная история физики: С древнейших времен до конца XVIII века.**
*Дорфман Я. Г.* **Всемирная история физики: С начала XIX до середины XX вв.**
*Шредингер Э.* **Мой взгляд на мир.** Пер. с нем.
*Борн М.* **Моя жизнь и взгляды.** Пер. с англ.
*Гейзенберг В.* **Часть и целое (беседы вокруг атомной физики).**
*Бунге М.* **Философия физики.**
*Джеммер М.* **Понятие массы в классической и современной физике.**
*Бриллюэн Л.* **Научная неопределенность и информация.**
*Рейхенбах Г.* **Философия пространства и времени.**
*Рейхенбах Г.* **Направление времени.**
*Уитроу Дж.* **Естественная философия времени.**
*Грюнбаум А.* **Философские проблемы пространства и времени.**
*Вигнер Э.* **Инвариантность и законы сохранения. Этюды о симметрии.**
*Марков М. А.* **О трех интерпретациях квантовой механики.**
*Севальников А. Ю.* **Интерпретации квантовой механики: В поисках новой онтологии.**
*Могилевский Б. М.* **Природа глазами физика.**
*Овчинников Н. Ф.* **Принципы сохранения.**
*Новиков А. С.* **Философия научного поиска.**
*Минасян Л. А.* **Иммануил Кант и современная космология.**
*Минасян Л. А.* **Единая теория поля. Опыт синергетического осмысления.**
*Поппер К. Р.* **Объективное знание. Эволюционный подход.** Пер. с англ.

Серия «Физико-математическое наследие: физика (философия физики)»

*Гейзенберг В.* **Философские проблемы атомной физики.**
*Кассирер Э.* **Теория относительности Эйнштейна.**
*Кузнецов Б. Г.* **Развитие научной картины мира в физике XVII–XVIII вв.**
*Бранский В. П.* **Философское значение «проблемы наглядности» в современной физике.**

**По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:**
***тел./факс*** **(499) 135–42–16, 135–42–46**
**или *электронной почтой*** **URSS@URSS.ru**
**Полный каталог изданий представлен**
**в *интернет-магазине:*** **http://URSS.ru**

**Научная и учебная литература**

URSS.ru URSS.ru URSS.ru URSS.ru

## Борис Григорьевич КУЗНЕЦОВ
## (1903–1984)

**Известный отечественный историк естествознания, специалист в области методологии и философии науки. Окончил аспирантуру Института экономики Российской ассоциации научно-исследовательских институтов общественных наук. Работал в Институте истории науки и техники, в Комиссии по истории естествознания АН СССР. В 1937 г. защитил докторскую диссертацию. С 1944 г. занимал пост заместителя директора Института истории естествознания и техники АН СССР.**

**Б. Г. Кузнецов — автор многих книг по истории, методологии и философии науки, получивших широкое признание читателей. Большую популярность имели его трилогия о развитии физической картины мира в XVII–XX вв., одно из лучших в мировой литературе жизнеописаний Альберта Эйнштейна, книги о жизни и научной деятельности Исаака Ньютона, Галилео Галилея, Джордано Бруно, а также многие другие работы о становлении современной научной картины мира.**

### Представляем другие книги нашего издательства:




2937 ID 52124

9 785397 011129 >

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

E-mail: URSS@URSS.ru

Тел./факс: 7 (499) 135–42–16

Тел./факс: 7 (499) 135–42–46

интернет-магазин OZON

4348

Любые отзывы о настоящем издании, а также обнаруженны
по адресу **URSS@URSS.ru**. Ваши замечания и предло
и отражены на web-странице этой книги в нашем интернет-магазине