

А. ЭЙНШТЕЙН, Л. ИНФЕЛЬД

# ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ

РАЗВИТИЕ ИДЕЙ  
ОТ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ  
ДО ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ  
И КВАНТОВ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ

*Перевод с английского  
и послесловие  
С. Г. СУВОРОВА*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1965

53 (09)

Э 33

УДК 530 (09)

# THE EVOLUTION OF PHYSICS

THE GROWTH OF IDEAS  
FROM EARLY CONCEPTS TO  
RELATIVITY AND QUANTA

by

ALBERT EINSTEIN  
and LEOPOLD INFELD

SIMON AND SCHUSTER  
NEW YORK 1954

# О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие . . . . .	5
-----------------------	---

## I. РАСЦВЕТ МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

Большая повесть о тайнах природы . . . . .	7
Первая руководящая идея . . . . .	9
Векторы . . . . .	14
Загадка движения . . . . .	19
Еще одна руководящая идея . . . . .	30
Является ли теплота субстанцией? . . . . .	34
Увеселительная горка . . . . .	40
Мера превращения . . . . .	44
Философские воззрения . . . . .	47
Кинетическая теория вещества . . . . .	50

## II. УПАДОК МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

Две электрические жидкости . . . . .	58
Магнитные жидкости . . . . .	68
Первая серьезная трудность . . . . .	72
Скорость света . . . . .	77
Свет как субстанция . . . . .	79
Загадка цвета . . . . .	81
Что такое волна? . . . . .	84
Волновая теория света . . . . .	88
Продольны или поперечны световые волны? . . . . .	96
Эфир и механистическое воззрение . . . . .	98

## III. ПОЛЕ И ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Поле как представление . . . . .	102
Две основы теории поля . . . . .	112
Реальность поля . . . . .	117
Поле и эфир . . . . .	123
Механические леса . . . . .	126
Эфир и движение . . . . .	135
Время, пространство, относительность . . . . .	147
Относительность и механика . . . . .	160
Пространственно-временной континуум . . . . .	165

Общая относительность . . . . .	173
Вне и внутри лифта . . . . .	178
Геометрия и опыт . . . . .	184
Общая относительность и ее экспериментальная проверка . . . . .	195
Поле и вещество . . . . .	199

## IV. КВАНТЫ

Непрерывность — прерывность . . . . .	204
Элементарные кванты вещества и электричества . . . . .	206
Кванты света . . . . .	211
Световые спектры . . . . .	217
Волны вещества . . . . .	221
Волны вероятности . . . . .	228
Физика и реальность . . . . .	239
<i>С. Г. Суворов.</i> ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ЭЙНШТЕЙНА . . . . .	243
Именной указатель . . . . .	327



## ПРЕДИСЛОВИЕ

*Прежде чем вы начинаете чтение, вы вправе ожидать ответа на некоторые простые вопросы. С какой целью написана эта книга? Кто тот воображаемый читатель, для которого она предназначается?*

*Трудно начать с ясного и последовательного ответа на эти вопросы. Гораздо легче ответить на них в конце книги, хотя это было бы совершенно лишним. Мы находим, что проще сказать, чем эта книга не стремится быть. Мы не писали учебника по физике. Здесь нет систематического изложения элементарных физических фактов и теорий. Скорее наше стремление состояло в том, чтобы широкими штрихами обрисовать попытки человеческого разума найти связь между миром идей и миром явлений. Мы стремились показать те активные силы, которые вынуждают науку создавать идеи, соответствующие реальности нашего мира. Но наше изложение должно быть простым. Сквозь лабиринт фактов и понятий мы должны были избрать столбовой путь, который казался нам самым характерным и значительным. Те факты и теории, которые не лежали на избранном пути, мы должны были опустить. Наша основная цель вынуждала нас сделать определенный выбор фактов и идей. О важности проблемы не следует судить по числу страниц, посвященных ей. Некоторые существенные направления мысли не были отражены не потому, что они казались нам несущественными, а потому что они не лежат на том пути, который мы избрали.*

*Когда мы писали книгу, мы вели длинные дискуссии о характере нашего идеализированного читателя и сильно беспокоились о нем. Мы восполняли полное отсутствие у него каких-либо конкретных сведений по физике и математике большим числом его достоинств. Мы считали его*

заинтересованным в физических и философских идеях и были вынуждены восхищаться тем терпением, с каким он пробивался через менее интересные и более трудные страницы. Он ясно сознавал, что для того, чтобы понять какую-либо страницу, он должен был внимательно прочитать предыдущие. Он знал, что научная, хотя бы и популярная, книга не может читаться так же, как новелла.

Книга — это беседа между вами и нами. Вы можете найти ее скучной или интересной, утомительной или возбуждающей, но наша цель будет достигнута, если эти страницы дадут некоторое представление о вечной борьбе изобретательного человеческого разума за более полное понимание законов, управляющих физическими явлениями.

А. Эйнштейн  
Л. Инфельд

# I. РАСЦВЕТ МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

---

*Великая повесть о тайнах природы.— Первая руководящая идея.— Векторы.— Загадка движения.— Еще одна руководящая идея.— Является ли теплота субстанцией? — Увеселительная горка.— Мера превращения.— Философские воззрения.— Кинетическая теория вещества.*

## ВЕЛИКАЯ ПОВЕСТЬ О ТАЙНАХ ПРИРОДЫ

В нашем воображении рисуется книга. Это искусно написанная повесть о событиях, обстоятельства которых скрыты от нас под покровом загадочных тайн. Повесть эта дает нам все существенные путеводные нити и заставляет нас создать свою собственную теорию происходящего. Если мы внимательно следуем замыслу повести, мы приходим к полному раскрытию всех обстоятельств еще раньше, чем автор раскрывает их в конце книги. Само это раскрытие, если речь идет не о плохой повести, не разочаровывает нас: оно появляется в тот самый момент, когда мы его ждем.

Можем ли мы уподобить читателя такой книги ученым, которые через все следующие друг за другом поколения продолжают добиваться раскрытия тайн в книге природы? Сравнение неверно и его нужно впоследствии отбросить, но оно имеет некоторое оправдание; его следует расширить и видоизменить, чтобы сделать более соответствующим попыткам науки разгадать тайну Вселенной.

Эта великая повесть о тайнах еще не окончена. Мы даже не можем быть уверены в том, что она имеет окончательное завершение. Но уже само чтение дало нам много. Оно научило нас основам языка природы. Оно позволило нам понять многие путеводные нити и было источником радости и духовного подъема в периоды усиленного продвижения науки. Но мы ясно представляем себе, что, несмотря на все прочитанные и разобранные тома, мы еще далеки от ее конца, если, конечно, такой конец вообще существует. В каждой стадии мы стремимся найти объяснение, находящееся в согласии с уже открытыми идеями.

заинтересованным в физических и философских идеях и были вынуждены восхищаться тем терпением, с каким он пробивался через менее интересные и более трудные страницы. Он ясно сознавал, что для того, чтобы понять какую-либо страницу, он должен был внимательно прочитать предыдущие. Он знал, что научная, хотя бы и популярная, книга не может читаться так же, как новелла.

Книга — это беседа между вами и нами. Вы можете найти ее скучной или интересной, утомительной или возбуждающей, но наша цель будет достигнута, если эти страницы дадут некоторое представление о вечной борьбе изобретательного человеческого разума за более полное понимание законов, управляющих физическими явлениями.

А. Эйнштейн

Л. Инфельд

# I. РАСЦВЕТ МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

---

*Великая повесть о тайнах природы.— Первая руководящая идея.— Векторы.— Загадка движения.— Еще одна руководящая идея.— Является ли теплота субстанцией? — Увеселительная горка.— Мера превращения.— Философские воззрения.— Кинетическая теория вещества.*

## ВЕЛИКАЯ ПОВЕСТЬ О ТАЙНАХ ПРИРОДЫ

В нашем воображении рисуется книга. Это искусно написанная повесть о событиях, обстоятельства которых скрыты от нас под покровом загадочных тайн. Повесть эта дает нам все существенные путеводные нити и заставляет нас создать свою собственную теорию происходящего. Если мы внимательно следуем замыслу повести, мы приходим к полному раскрытию всех обстоятельств еще раньше, чем автор раскрывает их в конце книги. Само это раскрытие, если речь идет не о плохой повести, не разочаровывает нас: оно появляется в тот самый момент, когда мы его ждем.

Можем ли мы уподобить читателя такой книги ученым, которые через все следующие друг за другом поколения продолжают добиваться раскрытия тайн в книге природы? Сравнение неверно и его нужно впоследствии отбросить, но оно имеет некоторое оправдание; его следует расширить и видоизменить, чтобы сделать более соответствующим попыткам науки разгадать тайну Вселенной.

Эта великая повесть о тайнах еще не окончена. Мы даже не можем быть уверены в том, что она имеет окончательное завершение. Но уже само чтение дало нам много. Оно научило нас основам языка природы. Оно позволило нам понять многие путеводные нити и было источником радости и духовного подъема в периоды усиленного продвижения науки. Но мы ясно представляем себе, что, несмотря на все прочитанные и разобранные тома, мы еще далеки от ее конца, если, конечно, такой конец вообще существует. В каждой стадии мы стремимся найти объяснение, находящееся в согласии с уже открытыми идеями.

Теории, принятые в качестве пробных, объяснили много фактов, но никакого общего решения, совместимого со всем тем, что нам известно, пока еще не достигнуто. Очень часто совершенная на вид теория оказывалась неверной. Появляются новые факты, которые противоречат теории или же не объясняются ею. Чем больше мы читаем, тем более полно и высоко оцениваем совершенную конструкцию книги, хотя полная разгадка ее тайн кажется все удаляющейся по мере того, как мы продвигаемся вперед.

Со времени великолепных рассказов Конан-Дойля почти в каждой детективной новелле наступает такой момент, когда исследователь собрал все факты, в которых он нуждается, по крайней мере, для некоторой фазы своей проблемы. Эти факты часто кажутся совершенно странными, непоследовательными и в целом не связанными. Однако великий детектив заключает, что в данный момент он не нуждается ни в каких дальнейших розысках и что только чистое мышление приведет его к установлению связи между собранными фактами. Он играет на скрипке, или, развалившись в кресле, наслаждается трубкой, как вдруг, о Юпитер, эта связь найдена! Он не только уже имеет в руках объяснение всех обстоятельств дела, но он знает, какие другие определенные события должны были случиться. Так как теперь он совершенно точно знает, где искать их, он может, если ему хочется, идти собирать дальнейшие подтверждения своей теории.

Ученый, читая книгу природы, если нам позволено будет повторить эту банальную фразу, должен сам найти разгадку, потому что он не может, как это часто делает нетерпеливый читатель других повестей, обратиться к концу книги. В нашем случае читатель — это тоже исследователь, который ищет, как объяснить, хотя бы отчасти, связь событий между собой. Чтобы получить даже частичное решение этой задачи, ученый должен собирать неупорядоченные факты и своим творческим мышлением делать их связанными и понятными.

Наша цель — в последующих страницах описать в общих чертах, какова работа физиков, соответствующая чистому мышлению исследователя. Мы будем, главным образом, касаться роли мыслей и идей в смелых исследованиях, имеющих целью познание физического мира.

## ПЕРВАЯ РУКОВОДЯЩАЯ ИДЕЯ

Попытки прочитать великую повесть о тайнах природы так же стары, как и само человеческое мышление. Однако лишь немногим более трех столетий назад ученые начали понимать язык этой повести. С того времени, т. е. со времени Галилея и Ньютона, чтение продвигалось быстро. Развилась техника исследования, систематические методы отыскания и изучения руководящих идей. Были разрешены некоторые загадки природы, хотя многие решения в свете дальнейших исследований оказались временными и поверхностными.

Самая фундаментальная проблема, оставшаяся в течение тысячи лет неразрешенной из-за ее сложности, — это проблема движения. Все движения, которые мы встречаем в природе, — движение камня, брошенного в воздух, движение плывущего в море корабля, движение повозки, тянущейся вдаль улицы, — в действительности очень сложны. Чтобы понять все эти явления, лучше всего начать с наиболее простых возможных случаев и постепенно продвигаться к более сложным. Рассмотрим тело, находящееся в покое. Чтобы изменить положение такого тела, необходимо оказать некоторое воздействие на него, толкнуть или поднять, или заставить действовать на него другие тела, например лошадь или паровую машину. Наша интуиция связывает движение с такими действиями, как толчок или тяга. Повторение опыта заставило бы нас отважиться на дальнейшее утверждение, что если мы хотим, чтобы тело двигалось быстрее, мы должны толкать его сильнее. Кажется естественным заключение, что чем сильнее действие, оказываемое на тело, тем больше будет его скорость. Карета, запряженная четверкой лошадей, движется быстрее, чем карета, запряженная парой. Таким образом, интуиция говорит нам, что скорость существенно связана с внешним воздействием.

Для читателей детективных выдумок привычно, что фальшивая нить запутывает повесть и отдаляет ее разрешение. Метод рассуждения, навязываемый интуицией, неверен и приводит к ложным идеям о движении, которые сохранялись в течение столетий. Может быть, главным

основанием продолжительной веры в эту интуитивную идею повсюду в Европе был великий авторитет Аристотеля. В «Механике», в продолжение двух тысяч лет приписываемой ему, мы читаем:

«Движущееся тело останавливается, если сила, его толкающая, прекращает свое действие».

Открытие, сделанное Галилеем, и применение им методов научного рассуждения были одним из самых важных достижений в истории человеческой мысли, и оно отмечает действительное начало физики. Это открытие учит нас тому, что интуитивным выводам, базирующимся на непосредственном наблюдении, не всегда можно доверять, так как они иногда ведут по ложному следу.

Но где интуиция ведет к ошибкам? Правильно ли сказать, что карета, запряженная четверкой лошадей, должна двигаться быстрее, чем запряженная только двумя?

Проверим ближе основные факты движения, начиная с простых повседневных опытов, хорошо известных человечеству с начала цивилизации и полученных в жестокой борьбе за существование.

Предположим, что некто, идущий по горизонтальной дороге с багажной тележкой, внезапно перестает ее толкать. Тележка будет двигаться еще некоторое время, пройдя небольшое расстояние, а затем остановится. Мы спрашиваем: как можно увеличить это расстояние? Для этого имеются различные способы, например смазывание колес или устройство более гладкой дороги. Чем легче вращаются колеса и чем ровнее дорога, тем дальше будет двигаться тележка. А что же дает смазывание колес или сглаживание неровностей пути? Только одно: становится меньше внешнее влияние. Уменьшается эффект, называемый трением, как в колесах, так и между колесами и дорогой. Это уже теоретическое толкование наблюдаемых данных, толкование, которое пока еще произвольно. Один важный шаг дальше, и мы попадем на правильный след. Представим себе совершенно гладкий путь и колеса, вовсе не имеющие трения. Тогда ничто не остановит тележки и она будет катиться вечно. Этот вывод достигнут только размышлением об идеализированном эксперименте, который никогда не может быть осуществлен, так как невозможно исклю-



чить все внешние влияния. Идеализированный эксперимент указывает путь, на котором фактически были установлены основы механики движения.

Сравнивая оба метода подхода к проблеме, мы можем сказать, что интуитивная идея такова: чем больше воздействие, тем больше скорость. Таким образом, наличие скорости показывает, действуют ли на тело внешние силы. Новый же путь, указанный Галилеем, таков: если ничто не толкает и не тянет тело или если на тело ничто не действует каким-либо другим образом, короче говоря, если на тело не действуют никакие силы, оно покоится или движется прямолинейно и равномерно, т. е. всегда с одинаковой скоростью по прямой. Следовательно, скорость сама по себе не показывает, действуют ли на тело внешние силы или нет. Правильный вывод Галилея был сформулирован спустя поколение Ньютоном в виде *закона инерции*. Этот закон — обычно первое из физики, что мы изучаем в школе наизусть, и многие из нас могут его вспомнить.

*Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если только оно не вынуждено изменять его под влиянием действующих сил.*

Мы видели, что закон инерции нельзя вывести непосредственно из эксперимента, его можно вывести лишь умозрительно — мышлением, связанным с наблюдением. Этот идеализированный эксперимент никогда нельзя выполнить в действительности, хотя он ведет к глубокому пониманию действительных экспериментов

Из многообразия сложных движений в окружающем нас мире мы выбираем в качестве первого примера прямолинейное и равномерное движение. Это движение — простейшее, ибо при этом на движущееся тело не действуют никакие внешние силы. Однако прямолинейное и равномерное движение никогда нельзя реализовать; камень, брошенный с башни, или тележка, толкаемая вдоль дороги, никогда не могут двигаться абсолютно прямолинейно и равномерно, потому что мы не можем полностью исключить влияния внешних сил.

В хорошей повести о загадочных тайнах самые очевидные нити часто ведут к ложным подозрениям. В наших попытках понять законы природы мы подобным же

образом находим, что самое очевидное интуитивное объяснение зачастую бывает ложным.

Человеческое мышление творит вечно изменяющуюся картину вселенной. Вклад Галилея в науку состоял в разрушении интуитивного воззрения и в замене его новым. В этом — значение открытия Галилея.

Но немедленно же возникают дальнейшие вопросы о движении. Если не скорость является показателем внешней силы, действующей на тело, то что же тогда? Ответ на этот фундаментальный вопрос был найден Галилеем, а вернее Ньютоном; он образует новую руководящую идею в наших исследованиях.

Чтобы найти правильный ответ, мы должны немного глубже вдуматься в опыт с тележкой на абсолютно гладкой дороге. Прямолинейность и равномерность движения в нашем идеализированном опыте были обязаны отсутствию всех внешних сил. Теперь представим себе, что прямолинейно и равномерно движущаяся тележка получает толчок в направлении движения. Что произойдет при этом? Очевидно, ее скорость увеличится. Так же очевидно, что толчок в направлении, противоположном направлению движения, должен уменьшить скорость. В первом случае движение тележки ускоряется толчком, во втором — замедляется. Вывод вытекает сразу же: действие внешней силы изменяет скорость. Таким образом, не сама скорость, а ее изменение есть следствие толчка или тяги. Сила либо увеличивает, либо уменьшает скорость, соответственно тому, действует ли она в направлении движения или в противоположном направлении. Галилей видел это ясно и написал в своем труде *«Беседы о двух новых науках»*:

«... скорость, однажды сообщенная движущемуся телу, будет строго сохраняться, поскольку устранены внешние причины ускорения или замедления, — условие, которое обнаруживается только на горизонтальной плоскости, ибо в случае движения по наклонной плоскости вниз уже существует причина ускорения, в то время как при движении по наклонной плоскости вверх налицо замедление; из этого следует, что движение по горизонтальной плоскости вечно, ибо, если скорость будет постоянной, движение не может быть уменьшено или ослаблено, а тем более уничтожено».

Идя по этому верному пути, мы достигаем более глубокого понимания проблемы движения. Основой классической механики, как она сформулирована Ньютоном,

является связь между силой и изменением скорости, а не между силой и самой скоростью, как мы думали, согласно интуиции.

Мы использовали два понятия, играющих принципиальную роль в классической механике: силу и изменение скорости. В дальнейшем развитии науки оба эти понятия расширяются и обобщаются. Поэтому они должны быть исследованы подробнее.

Что такое сила? Интуитивно мы чувствуем, что именно обозначается этим термином. Это понятие возникает из усилия, которое мы производим при толчке, броске или тяге, из того мускульного ощущения, которое сопровождает все эти действия. Но обобщение этих понятий выходит далеко за пределы столь простых примеров. Мы можем думать о силе, даже не воображая себе лошадь, тянущую повозку. Мы говорим о силе притяжения между Солнцем и Землей, Землей и Луной, и о таких силах, которые вызывают приливы и отливы. Мы говорим о силе, с которой Земля воздействует на все предметы вокруг нас, удерживая их в сфере своего влияния, и о силе ветра, производящей морские волны и приводящей в движение листья деревьев. Когда и где мы наблюдаем изменение скорости, тогда и там причиной этому является внешняя сила в самом общем смысле. Ньютон писал в своих *«Принципах»*:

«Воздействующая сила есть действие, оказываемое на тело, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Эта сила проявляется только в действии, она не сохраняется в теле, когда действие прекращается, ибо тело сохраняет всякое новое состояние, которое оно приобретает, исключительно благодаря его инерции. Воздействующие силы имеют различное происхождение: таковы силы удара, давления и центростремительные».

Если камень падает с вершины башни, его движение неравномерно: его скорость возрастает с падением. Мы заключаем, что в направлении движения действует внешняя сила или, другими словами, что Земля притягивает камень. Возьмем другой пример. Что происходит, когда камень брошен прямо вверх? Скорость уменьшается до тех пор, пока камень не достигнет своей наивысшей точки, после чего он начинает падать на Землю. Это уменьшение

скорости вызывается той же силой, что и ускорение падающего тела. В одном случае сила действует в направлении движения, в другом случае — в противоположном направлении. Сила одна и та же, но она вызывает или возрастание скорости или замедление, соответственно тому, падает ли камень или он брошен вверх.

## ВЕКТОРЫ

Все движения, которые мы только что рассматривали, — *прямолинейные*, т. е. являются движениями по прямой линии. Теперь мы должны сделать дальнейший шаг. Мы приходим к пониманию законов природы, анализируя простейшие случаи и опуская в своих первых попытках все усложнения. Прямая линия проще, чем кривая. Однако рассмотрением только прямолинейного движения удовлетвориться невозможно. Движения Луны, Земли и планет — как раз те движения, к которым принципы механики применялись с таким блестящим успехом, — это все движения по кривым путям. Переход от прямолинейного движения к криволинейному приносит новые трудности. Мы должны иметь смелость побороть их, если мы хотим понять принципы классической механики, давшей нам первую руководящую идею и создавшей тем самым исходную точку для развития науки.

Рассмотрим другой идеализированный эксперимент, в котором совершенно гладкий шар катится по гладкому столу. Мы знаем, что если шару дан толчок, т. е. если к нему приложена внешняя сила, то его скорость изменится. Предположим теперь, что направление удара не совпадает с линией движения, как это имело место в примере с тележкой. Пусть удар направлен иначе, скажем, перпендикулярно к этой линии. Что происходит с шаром? Можно различать три стадии движения: начальное движение, действие силы и конечное движение, после того как сила перестала действовать. Согласно закону инерции скорость как перед действием силы, так и после него, абсолютно постоянна. Но имеется различие между равномерным движением до и после действия силы: изменилось направление. Направление начального движения шара

и направление действия силы перпендикулярны друг к другу. Конечное движение будет совершаться не по какой-либо одной из этих линий, а где-то между ними, ближе к направлению силы, если толчок силен, а начальная скорость мала, и ближе к первоначальной линии движения, если толчок незначителен, а начальная скорость велика. Наш новый вывод, основанный на законе инерции, таков: в общем случае действие внешней силы изменяет не только скорость, но и направление движения. Понимание этого факта подготавливает нас к обобщению, введенному в физику понятием *вектора*.

Мы можем продолжать применение нашего непосредственного метода рассуждения. Исходная идея — это опять галилеев закон инерции. Мы еще далеко не исчерпали следствий этой ценной руководящей идеи в решении загадки движения.

Рассмотрим два шара, движущихся в разных направлениях по гладкому столу. Для большей определенности предположим, что оба направления перпендикулярны друг к другу. Так как никаких внешних сил нет, то движения шаров абсолютно равномерны. Предположим далее, что численно скорости их равны, т. е. оба шара за один и тот же промежуток времени покрывают одинаковое расстояние. Но правильно ли сказать, что оба шара имеют одинаковую скорость? Ответ может быть: либо да, либо нет! Если спидометры двух автомашин показывают сто километров в час, то обычно говорят, что они имеют одинаковую скорость независимо от того, в каком направлении они движутся. Но наука для своих нужд должна создавать свой собственный язык, свои собственные понятия. Научные понятия часто начинаются с понятий, употребляемых в обычном языке повседневной жизни, но они развиваются совершенно иначе. Они преобразовываются и теряют двусмысленность, связанную с обычным языком, они приобретают строгость, что и позволяет применять их в научном мышлении.

С физической точки зрения гораздо выгоднее сказать, что скорости двух шаров, движущихся в различных направлениях, различны. Хотя это — дело чистого соглашения, но гораздо удобнее сказать, что четыре автомашины, едущие из одного и того же пункта по различным дорогам,

имеют не одну и ту же скорость, даже если численно скорости, зарегистрированные на их спидометрах, все равны сорока километрам в час. Это различие между скоростью, взятой по абсолютной величине, и скоростью, в которой учитывается направление, иллюстрирует, как физика, отправляясь от понятия, употребляемого в повседневной жизни, изменяет его таким путем, который оказы-

вается плодотворным в дальнейшем развитии науки.

Если величина измерена, то результат выражается некоторым числом единиц. Длина отрезка может быть равна 3 метрам 7 сантиметрам, вес некоторого объекта равен 2 килограммам 3 граммам, измеренный промежуток времени — стольким-то минутам или секундам. В каждом таком случае результат измерения выражается числом.

Однако одного только числа недостаточно для описания некоторых физических понятий. Признание этого факта отмечает значительный успех в научном исследовании. Направление, так же как и число, существенно, например, для характеристики скорости. Такая величина, обладающая и числовым значением и направлением, называется *вектором*. Обычный символ для него — это стрелка. Скорость может быть представлена стрелкой или, короче говоря, вектором, длина которого в некоторой избранной шкале единиц выражает численное значение скорости, а направление которого есть направление движения.

Если четыре автомашины расходятся с численно одинаковой скоростью из одного пункта, то их скорости могут быть представлены четырьмя векторами одинаковой длины, как это видно на рисунке 1. В избранной шкале один сантиметр представляет сорок километров в час. Таким путем любая скорость может быть обозначена вектором и, наоборот, если известна шкала, то из такой векторной диаграммы может быть установлена скорость.

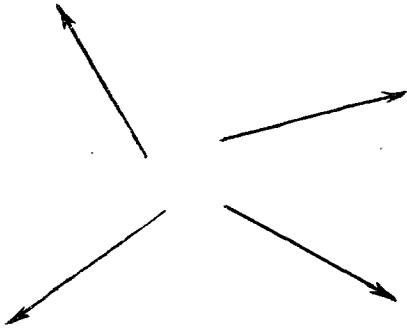


Рис. 1.

Если две автомашины проходят по автостраде мимо друг друга и их спидометры показывают сто километров в час, то мы характеризуем их скорости двумя различными векторами со стрелками, заостренными в противоположных направлениях (рис. 2). Точно так же и стрелки, указывающие направление «в город» и «из города» в нью-йоркском метро, должны быть заострены в противоположных направлениях. Но все поезда, идущие в город с численно равной скоростью, имеют одинаковую скорость и по направлению, которая может быть представлена одним и тем же вектором. Однако вектор ничего не говорит о том, какую станцию поезд проходит или по какому из многих параллельных путей он идет. Другими словами, согласно выбранному условию все такие векторы, какие нарисованы ниже (рис. 3), можно считать равными: они лежат либо вдоль одной и той же линии, либо вдоль ей параллельных



Рис. 2.

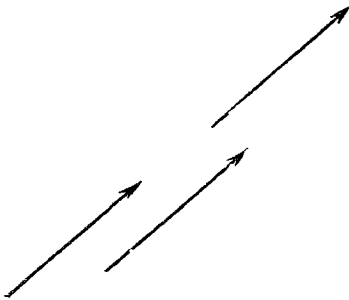


Рис. 3.

либо вдоль одной и той же линии, либо вдоль ей параллельных

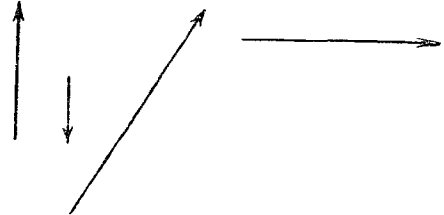


Рис. 4.

и имеют стрелки, заостренные в том же самом направлении. Следующий рисунок показывает различные векторы, ибо они отличаются либо по длине, либо по направлению, либо по тому и другому вместе. Те же самые четыре вектора можно нарисовать другим путем, так, чтобы все они расходились из одной точки (рис. 5). Так как исходная точка несущественна, то эти векторы могут представлять скорости четырех автомашин, движущихся из одного пункта, либо же скорости четырех автомашин в различных частях страны, путешествующих с указанными скоростями в указанных направлениях.

Это векторное представление можно применить к описанию обсуждавшихся ранее фактов прямолинейного движения. Мы говорили о тележке, движущейся равномерно по прямой и получающей толчок в направлении

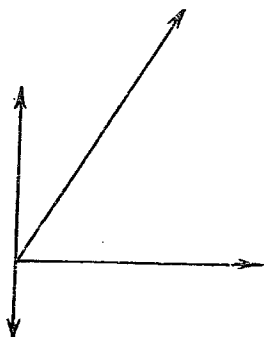


Рис. 5.

ее движения, который увеличивает ее скорость. Графически это можно представить двумя векторами: коротким, обозначающим скорость до толчка, и длинным, имеющим то же направление и обозначающим скорость после толчка (рис. 6). Значение пунктирного вектора ясно. Он представляет собой изменение скорости, вызванное толчком. В случае, когда сила направлена против движения и движение замедляется, диаграмма выглядит иначе (рис. 7). Пунктирный вектор опять соответствует изменению скорости, но в этом случае его направление иное. Ясно, что не только

сами скорости, но и их изменения — тоже векторы. Но всякое изменение скорости вызвано внешней силой; следовательно, и сила должна быть представлена тоже вектором. Для того чтобы характеризовать силу, недостаточно установить, с каким усилием мы толкаем тележку; мы должны также сказать, в каком направлении

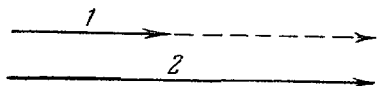


Рис. 6.

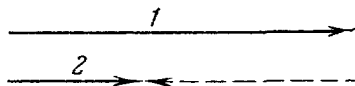


Рис. 7.

мы толкаем. Сила, как и скорость и ее изменение, должна быть представлена вектором, а не только одним числом. Поэтому внешняя сила — это тоже вектор, который должен иметь то же направление, что и изменение скорости. На обоих рисунках пунктирные векторы показывают как направление силы, так и изменение скорости.

Здесь скептик может заметить, что он не видит никакого преимущества от введения векторов. Все, что было сделано, — это перевод признанных ранее фактов на необыч-



ный и сложный язык. В этой стадии, в самом деле, было бы трудно убедить скептика, что он неправ. Пока он, действительно, прав. Но мы увидим, что именно этот странный язык приводит к важным обобщениям, в которых векторы оказываются существенными.

### ЗАГАДКА ДВИЖЕНИЯ

До тех пор, пока мы имеем дело с прямолинейным движением, мы далеки от понимания движений, наблюдаемых в природе. Мы должны рассмотреть криволинейные движения. Наш следующий шаг — определить законы, управляющие такими движениями. Это нелегкая задача.

В случае прямолинейного движения понятия скорости, изменения скорости и силы оказались чрезвычайно полезными. Но мы не видим непосредственно, как можно применить их к случаю криволинейного движения. В самом деле, можно представить себе, что старые понятия окажутся непригодными для описания движения в общем случае и что нужно создать новые понятия. Следует ли нам пробовать идти старыми путями, или нужно искать новые?

Обобщение понятий — процесс, часто применяемый в науке. Метод обобщения не определен однозначно, ибо обычно существует множество путей его осуществления. Однако при всяком обобщении должно быть строго удовлетворено одно требование: любое обобщенное понятие должно сводиться к первоначальному, когда выполнены первоначальные условия.

Лучше всего это можно объяснить на примере, с которым мы имеем дело теперь. Мы можем попробовать обобщить прежние понятия скорости, изменения скорости и силы для случая движения вдоль кривой. Когда мы говорим о кривой, мы включаем в это понятие и прямую. Прямая есть особый тривиальный пример кривой. Поэтому, если скорость, изменение скорости и сила введены для движения по кривой, то они тем самым автоматически вводятся и для движения по прямой. Но этот результат не должен противоречить результатам, полученным

раньше. Если кривая становится прямой, то все обобщенные понятия должны свестись к обычным понятиям, описывающим прямолинейное движение. Но это ограничение недостаточно, чтобы однозначно определить обобщение. Оно явно оставляет многие возможности. История науки показывает, что самые простые обобщения иногда оказываются удачными, а иногда нет. Мы должны сперва делать догадки. В нашем случае нетрудно найти правильный метод обобщения. Новые обобщенные понятия оказываются очень удачными и помогают нам понять как движение брошенного камня, так и движение планет.

Что же означают слова «скорость», «изменение скорости» и «сила» в общем случае криволинейного движения? Начнем со скорости. Пусть вдоль кривой слева направо



Рис. 8.

движется очень маленькое тело (рис. 8). Такое маленькое тело часто называют *частицей*. Точка на кривой на нашем рисунке показывает положение частицы в некоторый момент времени. Какова скорость, соответствующая этому моменту времени и положению? Опять руководящая идея Галилея наводит нас на тот путь, каким введена скорость. Мы должны еще раз использовать свое воображение и представить себе идеализированный эксперимент. Частица движется вдоль кривой слева направо под влиянием внешних сил. Представим себе, что в данный момент времени в точке, отмеченной на рисунке, все эти силы внезапно перестают действовать. Тогда согласно закону инерции движение должно быть равномерным и прямолинейным. Практически мы, конечно, никогда не можем полностью освободить тело от внешних влияний. Мы можем только сделать предположение: «что должно произойти, если...» и судить об уместности нашего предположения с помощью заключений, которые можно из него сделать, и проверки согласия этих заключений с экспериментом.

Вектор на следующем рисунке указывает предполагаемое направление равномерного движения в случае, если бы все внешние силы исчезли. Это так называемое тангенциальное или касательное направление. Если смотреть на движущуюся частицу через микроскоп, то можно увидеть очень небольшую часть ее пути, представляющуюся



Рис. 9.

в виде небольшого, едва искривленного отрезка. Касательная линия является его продолжением. Нарисованный таким образом вектор представляет скорость в данный момент. Вектор скорости лежит на касательной линии. Его длина представляет собой численную величину скорости или ту скорость, которая указывается, например, спидометром автомашины.

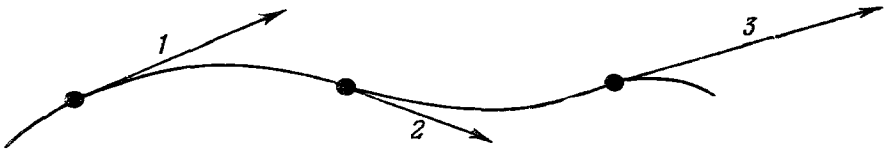


Рис. 10.

Наш идеализированный эксперимент, в котором уничтожены силы для того, чтобы найти вектор скорости, нельзя принимать слишком серьезно. Он только помогает нам понять, что мы должны называть вектором скорости при криволинейном движении, и позволяет нам определить его для данного момента в данной точке.

На рисунке 10 показаны векторы скорости для трех различных положений частицы, движущейся вдоль кривой. В этом случае во время движения меняются не только направления, но и величины скорости, как показывает длина векторов.

Удовлетворяет ли это новое понятие скорости требованию, сформулированному для всех обобщений? Иначе говоря, сводится ли оно к прежнему понятию скорости, если кривая становится прямой? Очевидно, да. Касательная к прямой есть сама прямая. Вектор скорости лежит на линии движения, так же как это было в случае движущейся тележки или катящегося шара.

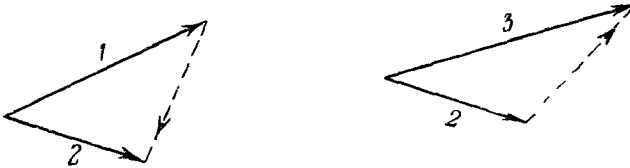


Рис. 11.

Следующий шаг — это введение изменения скорости частицы, движущейся вдоль кривой. Оно также может быть выполнено различными путями, из которых мы выберем самый простой и удобный. Последний рисунок показывал несколько векторов скоростей, представляющих движение вдоль кривой в разных точках. Первые два из них можно опять нарисовать так, чтобы они имели общую

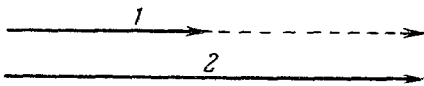


Рис. 12.

исходную точку (рис. 11), что, как мы видели, возможно проделывать с векторами. Пунктирный вектор мы называем изменением скорости. Его начальная точка представляет собой конец первого вектора, а конечная точка — конец второго вектора. Этим и определено изменение скорости. Такое определение может на первый взгляд показаться искусственным и бессмысленным. Оно становится гораздо яснее в особом случае, в котором векторы 1 и 2 имеют одинаковое направление (рис. 12). Конечно, это означает переход к случаю прямолинейного движения. Если оба вектора имеют одну и ту же начальную точку, то пунктирный вектор опять связывает их конечные точки. Рисунок 12 совпадает с рисунком 6 на стр. 18, а прежнее понятие оказывается частным случаем нового понятия. Следует заметить, что мы должны были разделить обе

линии на рисунке, ибо иначе они совпали бы и стали неразличимы.

Теперь мы должны сделать последний шаг в процессе обобщения. Это будет самой важной из всех догадок, которые мы сделали до сих пор. Связь между силой и изменением скорости должна быть установлена так, чтобы мы могли найти руководящую идею, позволяющую нам понять общие проблемы движения.

Руководящая идея для объяснения движения вдоль прямой была весьма простой: внешняя сила вызывает изменение скорости; вектор силы имеет то же направление, что и изменение скорости. Но что теперь следует рассматривать в качестве руководящей идеи для криволинейного движения? Совершенно то же самое! Единственное различие в том, что изменение скорости имеет теперь более общее значение, чем раньше. Мимолетный взгляд на пунктирные векторы на двух последних рисунках показывает это очень ясно. Если скорость известна для всех точек кривой, то направление силы в любой точке может быть найдено сразу же. Нужно нарисовать векторы скорости для двух моментов, отделенных очень короткими интервалами времени, а стало быть, соответствующих положениям, очень близким друг к другу. Вектор, проведенный из конца первого вектора к концу второго, показывает направление действующей силы. Но существенно, что оба вектора скорости должны быть отделены лишь «очень коротким» интервалом времени. Строгий анализ таких слов, как «очень близкий», «очень короткий», далеко не прост. Именно этот анализ привел Ньютона и Лейбница к открытию дифференциального исчисления.

Путь, который привел к обобщению руководящей идеи Галилея, длинен и извилист. Мы не можем показать здесь, какими изобильными и плодотворными оказались последствия этого обобщения. Его применение приводит к простому и удобному объяснению многих фактов, до того времени несогласованных и непонятных.

Из всего разнообразия движений мы возьмем лишь самое простое и применим к его объяснению только что сформулированные законы.

Пуля, выпущенная из ружья, камень, брошенный под углом к горизонту, струя воды, выходящая из трубы,—

все они описывают хорошо известную траекторию одного и того же типа — параболу. Вообразим себе, например, что к камню присоединен спидометр, так что вектор скорости камня может быть определен для любого момента.

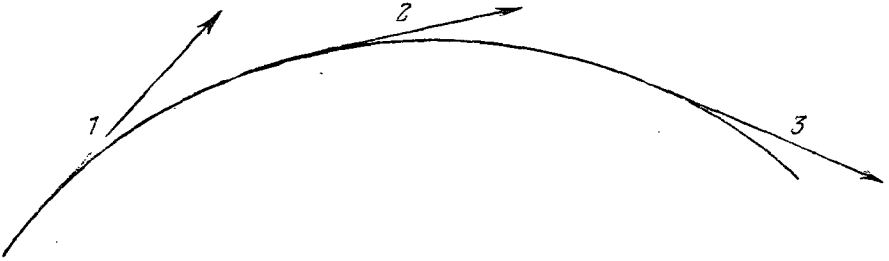


Рис. 13.

Результат представлен на рисунке 13. Направление действующей на камень силы совершенно такое же, как и направление изменения скорости; мы уже видели, как его можно определить. Следующий рисунок показывает, что сила вертикальна и направлена вниз. Совершенно то же



Рис. 14.

самое мы видим, рассматривая движение камня, брошенного с вершины башни. Пути, а также и скорости, совершенно различны, но изменения скоростей имеют одинаковое направление — к центру Земли.

Камень, привязанный к веревке и вращающийся в горизонтальной плоскости, движется по окружности. Все векторы на диаграмме, представляющей это движение, имеют одинаковую длину, если величина скорости постоянна (рис. 15). Тем не менее вектор скорости непрерывно меняется, так как траектория не прямолинейна. Только в равномерном прямолинейном движении не участвуют

никакие силы. Здесь же сила налицо, и скорость изменяется, но не по величине, а по направлению. Согласно закону движения должна существовать некоторая сила,

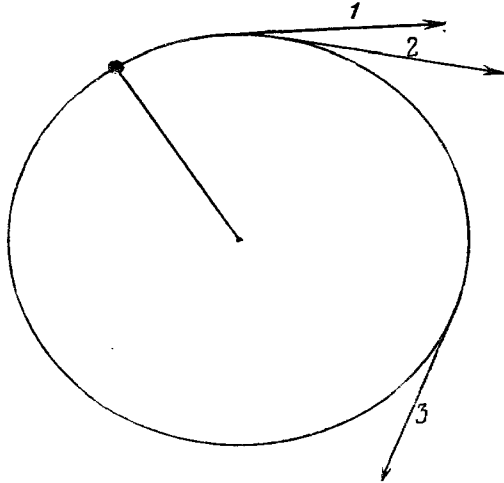


Рис. 15.

вызывающая это изменение; в данном случае сила действует между камнем и рукой, держащей веревку.

Сразу же возникают дальнейшие вопросы: в каком направлении действует сила? Опять векторная диаграмма дает ответ. На рисунке 16 даны векторы скоростей для двух очень близких точек и найдено ускорение. Видно, что этот последний вектор должен быть направлен вдоль веревки к центру окружности и всегда перпендикулярен к вектору скорости или касательной. Другими словами, рука через веревку воздействует на камень с некоторой силой.

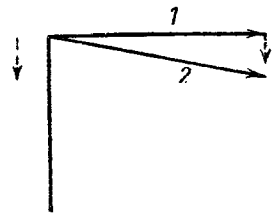


Рис. 16.

Совершенно аналогичен и более важный пример — обращение Луны вокруг Земли. Обращение Луны можно считать приблизительно за равномерное круговое движение. Сила, действующая на Луну, направлена к Земле, что можно вывести на том же основании, на каком в

предыдущем примере выведено, что сила была направлена к руке. Никакой веревки, связывающей Луну и Землю, нет, но мы можем представить себе линию между центрами обоих тел; сила лежит на этой линии и направлена к центру Земли, как и сила, действующая на камень, брошенный в воздух или падающий с башни.

Все, что мы сказали о движении, можно суммировать в одном предложении. *Сила и изменение скорости суть векторы, имеющие одно и то же направление.* Это чрезвычайно важная руководящая идея, но она недостаточна для полного объяснения всех наблюдаемых движений. Переход от аристотелева образа мышления к галилееву положил самый важный краеугольный камень в обоснование науки. Прорыв был сделан, линия дальнейшего развития была ясна. Наш интерес здесь лежит в первоначальной стадии развития, в исследовании начальной руководящей идеи, в раскрытии того, как рождаются новые физические понятия в жестокой борьбе со старыми идеями. Мы касались только новаторских работ в науке, состоящих в нахождении новых и неожиданных путей развития; мы касались только прогресса в научной мысли, создающей вечно изменяющуюся картину мира. Начальные и основополагающие шаги всегда имеют революционный характер. Научное воображение находит старые понятия слишком ограниченными и заменяет их новыми. Развитие, продолжающееся по какой-либо уже принятой линии, эволюционно до тех пор, пока не достигается следующий поворотный пункт, когда должно быть завоевано новое поле исследования. Но чтобы понять, какие основания и какие трудности вызывают изменение основных понятий, мы должны знать не только исходные руководящие идеи, но и выводы, которые могут быть из них сделаны.

Одна из наиболее важных характерных черт современной физики состоит в том, что выводы, сделанные из начальных идей, имеют не только качественный, но и количественный характер. Рассмотрим опять камень, падающий с башни. Мы видели, что его скорость возрастает по мере того, как он падает, но мы хотели бы знать гораздо больше. А именно, каково это изменение? Каковы положение и скорость камня в любой момент после того, как он начал падать? Нам хочется уметь предсказывать собы-



тия и определять с помощью эксперимента, подтверждает ли наблюдение эти предсказания, а тем самым и исходные положения.

Чтобы сделать количественные выводы, мы должны использовать математический язык. Самые фундаментальные идеи науки по существу своему просты и, как правило, могут быть выражены языком, понятным каждому. Но чтобы охватить всю совокупность следствий, выводимых из той или иной общей идеи, требуется знание высоко утонченной техники исследования. И если мы хотим сделать выводы, которые можно сравнить с результатами эксперимента, нам необходима математика как орудие исследования. Поскольку мы касаемся только фундаментальных физических идей, мы можем избежать языка математики. Так как в этой книге мы проводим это последовательно, мы должны иногда ограничиваться ссылкой без доказательств на некоторые результаты, необходимые для понимания руководящих идей, возникающих в дальнейшем развитии. Этот отказ от математического языка оплачивается потерей в точности и необходимостью временно ссылаться на результаты без указания на то, как они были достигнуты.

Очень важный пример движения — движение Земли вокруг Солнца. Известно, что ее путь представляет собой замкнутую кривую, называемую эллипсом (рис. 17). Построение векторной диаграммы изменения скорости показывает, что сила, действующая на Землю, направлена к Солнцу. Но после всего сказанного — это скудная информация. Нам хотелось бы уметь предсказывать положения Земли и других планет для любого произвольного момента времени. Нам хотелось бы предсказать дату и продолжительность следующего солнечного затмения и многие другие астрономические события. Все это возможно сделать, но не на основе одной только исходной идеи, указанной выше, ибо необходимо знать не только направление силы, но и ее абсолютное значение, ее величину. Вдохновенной догадкой об этом мы обязаны Ньютону. Согласно его *закону тяготения* сила притяжения между двумя телами простым образом зависит от расстояния их друг от друга: она уменьшается, когда увеличивается расстояние. Когда расстояние удваивается, она уменьшается

в  $2 \times 2 = 4$  раза; когда расстояние увеличивается в три раза, она уменьшается в  $3 \times 3 = 9$  раз.

Таким образом, мы видим, что в случае силы тяготения нам удалось выразить в простой форме зависимость силы от расстояния между движущимися телами. Подобным же образом мы поступаем во всех иных случаях, когда действуют силы других видов, например электрические,

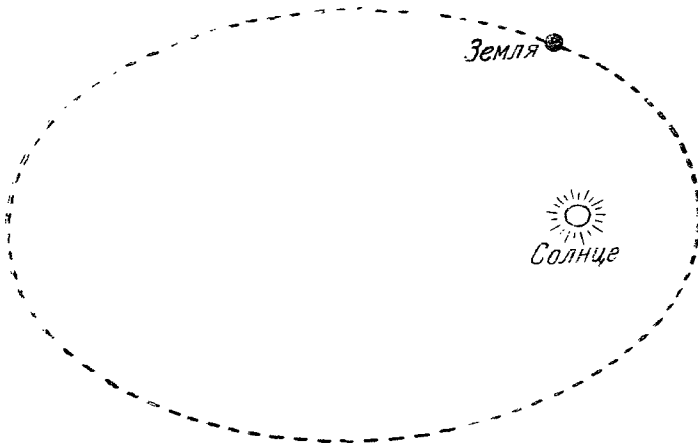


Рис. 17.

магнитные и другие силы. Мы стремимся дать для силы простое выражение. Такое выражение оправдывается лишь в том случае, когда из него можно сделать выводы, подтверждаемые экспериментом.

Но знание одной только силы тяготения недостаточно для описания движения планеты. Мы видели, что векторы, представляющие силу и изменение скорости, для любого короткого промежутка времени имеют одно и то же направление, но мы должны вслед за Ньютоном сделать еще один шаг, предположив простое отношение между их длинами. Если взять все другие условия одинаковыми, т. е. исследовать движение одного и того же тела и изменения скорости рассматривать через одинаковые промежутки времени, то, по Ньютону, изменение скорости пропорционально силе.

Таким образом, для количественных заключений о движении планет необходимы два дополнительных предположения. Одно — общего характера, устанавливающее связь между силой и изменением скорости. Другое — специального: оно устанавливает точную зависимость частного вида рассматриваемой силы от расстояния между телами. Первое — это общий закон движения Ньютона, второе — его закон тяготения. Совместно они определяют движение планет. Это можно сделать ясным при помощи следующего, несколько неуклюже звучащего рассуждения. Предположим, что в данный момент как положение, так и скорость планеты могут быть определены и что сила известна. В таком случае согласно закону Ньютона мы узнаем изменение скорости за очень короткий промежуток времени. Зная начальную скорость и ее изменение, мы можем найти скорость и положение планеты в конце указанного промежутка времени. Повторяя этот процесс, мы можем проследить весь путь движения, не прибегая в дальнейшем к помощи начальных данных. Однако метод, примененный здесь, практически весьма неудобен. Практически такая последовательная процедура была бы столь же скучна, сколь и не точна. К счастью, она не является необходимой: математика дает нам более короткий путь и делает возможным точное описание движения, на которое нужно гораздо меньше чернил, чем мы употребляем для написания одной только фразы. Достигнутые таким путем выводы могут быть доказаны или опровергнуты наблюдением.

Внешнюю силу того же вида, что и в рассмотренном примере движения Земли, можно обнаружить и в движении камня, падающего в воздухе, и во вращении Луны по ее орбите; это — сила земного притяжения материальных тел. Ньютон установил, что движение падающих камней, движение Луны и планет — это только очень специальные проявления универсальной силы тяготения, действующей между двумя любыми телами. В простых случаях движение может быть описано и предсказано с помощью математики. В отдельных чрезвычайно сложных случаях, когда рассматривается действие многих тел друг на друга, математическое описание не так просто, но основные принципы те же самые.

Мы находим, что выводы, к которым мы пришли, следуя нашей исходной руководящей идее, осуществляются в движении брошенного камня, в движении Луны, Земли и планет.

Такова фактически вся наша система положений, которая должна быть доказана или опровергнута экспериментом. Ни одно из положений не может быть выделено для самостоятельного испытания. Найдено, что в отношении планет, движущихся вокруг Солнца, система механики действует блестяще. Тем не менее мы легко можем представить себе, что другая система механики, основанная на других предположениях, может оказаться столь же хорошей.

Физические понятия суть свободные творения человеческого разума и не однозначно определены внешним миром, как это иногда может показаться. В нашем стремлении понять реальность мы отчасти подобны человеку, который хочет понять механизм закрытых часов. Он видит циферблат и движущиеся стрелки, даже слышит тиканье, но он не имеет средств открыть их корпус. Если он остроумен, он может нарисовать себе некую картину механизма, которая отвечала бы всему, что он наблюдает, но он никогда не может быть вполне уверен в том, что его картина единственная, которая могла бы объяснить его наблюдения. Он никогда не будет в состоянии сравнить свою картину с реальным механизмом, и он не может даже представить себе возможность или смысл такого сравнения. Но он, конечно, уверен в том, что по мере того, как возрастает его знание, его картина реальности становится все проще и проще и будет объяснять все более широкий ряд его чувственных восприятий. Он может также верить в существование идеального предела знаний и в то, что человеческий разум приближает этот предел. Этот идеальный предел он может назвать объективной истиной.

### ЕЩЕ ОДНА РУКОВОДЯЩАЯ ИДЕЯ

Впервые изучающие механику получают впечатление, что все в этой ветви науки просто, основательно и сохраняется на все времена. Едва ли кто-нибудь подозревал существование новой важной руководящей идеи, которая

ником не была замечена в течение трех столетий. Эта оставшаяся вне поля зрения идея связана с одним из фундаментальных понятий механики — с понятием *массы*.

Вернемся снова к идеализированному эксперименту, а именно к тележке на совершенно гладкой поверхности. Если тележка вначале находится в покое, а затем получает толчок, то она будет двигаться прямолинейно и равномерно с определенной скоростью. Предположим, что воздействие силы на покоящуюся тележку можно по желанию повторять сколько угодно раз, следовательно, механизм, производящий толчки, действует каждый раз одинаково и возбуждает одинаковую силу, действующую на одну и ту же тележку. Однако, сколько бы ни повторялся эксперимент, конечная скорость тележки будет всегда одна и та же. Но что случится, если эксперимент изменяется, если раньше тележка была пустая, а теперь она нагружена? Нагруженная тележка будет иметь меньшую конечную скорость, чем пустая. Вывод таков: если одна и та же сила действует на два различных тела, причем оба вначале покоятся, то результирующие скорости будут неодинаковыми. Мы говорим, что конечная скорость зависит от массы тела, она меньше, если масса тела больше.

Поэтому мы знаем, по крайней мере в теории, как определить массу тела или, точнее, как определить, во сколько раз одна масса больше другой. Пусть одинаковые силы действуют на две покоящиеся массы. Найдя, что скорость первой массы в три раза больше, чем скорость второй, мы заключаем, что первая масса в три раза меньше второй. Конечно, это не очень удобный путь определения отношения двух масс. Тем не менее мы легко можем представить, что это можно сделать либо указанным, либо аналогичным путем, основанным на применении закона инерции.

Как же мы фактически определяем массу на практике? Конечно, не таким методом, какой только что описан. Каждый знает, каков правильный ответ. Мы определяем ее посредством взвешивания на весах.

Обсудим подробнее два различных пути определения массы.

Первый эксперимент не имеет ничего общего с тяжестью, притяжением к Земле. Тележка, получив толчок,

движется по абсолютно гладкой горизонтальной плоскости. Сила тяжести, заставляющая тележку оставаться на плоскости, не изменяется и не играет никакой роли в определении массы. Это определение массы отличается от взвешивания. Мы никогда не могли бы применять весы, если бы Земля не притягивала тела, если бы не существовала тяжесть. Различие между обоими определениями масс состоит в том, что первое никак не связано с существованием силы тяжести, в то время как второе целиком основано на ее существовании.

Мы спрашиваем: если мы определяем отношение двух масс обоими путями, описанными выше, то получим ли мы одинаковый результат? Ответ, данный экспериментом, совершенно ясен. Результаты точно одинаковы! Этот вывод нельзя было бы предугадать: он основывается на наблюдении, а не на рассуждении. Назовем, ради простоты, массу, определенную первым путем, *инертной массой*, а массу, определенную вторым путем, *тяжелой массой*. В нашем мире они равны, но мы легко могли бы представить себе случай, когда это вовсе не имело бы места. Немедленно возникает другой вопрос: является ли это равенство обеих масс чисто случайным, или же оно имеет более глубокий смысл? С точки зрения классической физики ответ таков: равенство обеих масс случайно, и нет никакого смысла придавать этому факту большое значение. Ответ современной физики совершенно противоположен: равенство обеих масс имеет фундаментальный смысл и составляет новую, весьма существенную руководящую идею, ведущую к более глубокому познанию мира. Действительно, это была одна из самых важных идей, из которых развилась так называемая общая теория относительности.

Нам представляется, что повесть о неких тайнах ниже по своему достоинству, если она загадочные события описывает как случайные. Конечно, нас больше удовлетворила бы повесть, которая следовала бы разумному образцу. Точно так же и теория, которая дает объяснение равенства тяжелой и инертной масс, превосходит теорию, трактующую их равенство как некоторую случайность, конечно, если обе эти теории одинаково удовлетворяют наблюдаемым фактам.

Так как это равенство инертной и тяжелой масс было фундаментальным для формулировки теории относительности, мы остановимся здесь подробнее на ее проверке. Какие эксперименты убедительно доказывают, что обе массы одинаковы? Ответ заключается в старом эксперименте Галилея, в котором он бросал тела различной массы с башни. Он заметил, что время, которое требовалось для падения, было всегда одинаково, т. е. движение падающего тела не зависит от массы. Чтобы связать этот простой, но чрезвычайно важный экспериментальный результат с наличием равенства обеих масс, необходимы более сложные рассуждения.

Поддаваясь действию внешней силы, покоящееся тело приходит в движение и достигает некоторой скорости. Оно уступает действию силы более или менее легко, соответственно его инертной массе, сильнее сопротивляясь изменению движения тогда, когда масса велика, чем тогда, когда она мала. Не претендуя на строгость, мы можем сказать: готовность, с какою тело отзывается на воздействие внешней силы, зависит от его инертной массы. Если бы Земля притягивала все тела с одинаковой силой, то самая большая масса должна была бы двигаться медленнее при падении, чем любая другая. В действительности же все тела падают одинаково. Это означает, что сила, с которой Земля притягивает различные массы, различна. Так, Земля, притягивая камень с некоторой силой, ничего не знает об его инертной массе. «Призывная» сила Земли зависит от тяжелой массы. «Ответное» движение камня зависит от инертной массы. Так как «ответное» движение всегда одинаково — все тела падают с одной и той же высоты одинаково, — то отсюда вытекает, что тяжелая и инертная массы равны.

То же самое заключение физик формулирует более педантично: ускорение падающего тела возрастает пропорционально его тяжелой массе, а убывает пропорционально его инертной массе. Так как все падающие тела имеют одно и то же постоянное ускорение, то обе массы должны быть равны.

В нашей повести о великих тайнах природы нет проблем, полностью разрешенных и установленных на все времена. Три сотни лет спустя мы должны были вернуться

к первоначальной проблеме движения, исправить процедуру исследования, найти руководящую идею, которая не была ранее найдена, и тем самым построить новую картину окружающего нас мира.

### ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ ТЕПЛОТА СУБСТАНЦИЕЙ?

Здесь мы начинаем исследовать новую руководящую идею, возникшую в области тепловых явлений. Однако невозможно разделить науку на отдельные несвязанные разделы. В самом деле, мы скоро увидим, что введенные здесь новые понятия тесно переплетаются с понятиями, уже известными, и с понятиями, которые мы еще встретим. Ход мыслей, развитый в одной ветви науки, часто может быть применен к описанию явлений, с виду совершенно отличных. В этом процессе первоначальные понятия часто видоизменяются, чтобы продвинуть понимание как явлений, из которых они произошли, так и тех, к которым они вновь применены.

Самые основные понятия в описании тепловых явлений это — *температура* и *теплота*. В истории науки потребовалось чрезвычайно много времени для того, чтобы оба эти понятия были разделены, но когда это разделение было произведено, оно вызвало быстрый прогресс науки. Хотя эти понятия теперь известны каждому, мы исследуем их подробнее, подчеркнув различие между ними.

Наше чувство осязания совершенно определенно сообщает нам, что одно тело теплое, а другое — холодное. Но это чисто качественный критерий, недостаточный для количественного описания, а иногда даже двусмысленный. Это подтверждается хорошо известным экспериментом: пусть мы имеем три сосуда, содержащих относительно холодную, теплую и горячую воду. Если мы опустим одну руку в холодную воду, а другую — в горячую, то получим ощущение, что первая вода холодна, а вторая — горяча. Если затем мы опустим обе руки в теплую воду, то мы получим два противоречивых ощущения. На этом же основании жители северных и экваториальных стран, встречаясь в Нью-Йорке в весенний день, держались бы различных мнений о том, теплая или холодная была погода



в момент их встречи. Мы разрешаем все эти вопросы применением термометра, инструмента, спроектированного в примитивной форме Галилеем. (Опять то же известное имя!) Применение термометра основано на некоторых очевидных физических предположениях. Мы напомним о них, приведя несколько строк из лекции, прочитанной около ста сорока лет тому назад Блэком\*), который много способствовал делу разъяснения трудностей, связанных с обоими понятиями — понятием теплоты и понятием температуры.

«Благодаря применению этого инструмента мы узнали, что если мы возьмем тысячу или более различных видов вещества, таких, как металлы, камни, соли, дерево, перья, шерсть, вода и многообразие других жидкостей, причем все они вначале будут различной *теплоты*, поместим их вместе в одну и ту же комнату без огня и без солнечного света, то теплота будет передаваться от более горячего из этих тел к более холодному, может быть, в течение нескольких часов или в течение дня, а в конце этого времени термометр, последовательно приложенный ко всем телам, покажет точно одну и ту же степень нагретости.

Выделенное курсивом слово *теплота* согласно теперешней терминологии должно быть заменено словом *температура*.

Врач, рассматривая термометр, с помощью которого он измерял температуру больного человека, может рассуждать приблизительно так: «Термометр показывает свою собственную температуру длиной своего ртутного столбика. Мы предполагаем, что длина ртутного столбика возрастает пропорционально возрастанию температуры. Но термометр был в течение нескольких минут в соприкосновении с моим пациентом, так что и пациент и термометр имеют одну и ту же температуру. Поэтому я заключаю, что температура моего пациента та же, что и температура, зарегистрированная термометром». Доктор, вероятно, действует механически, но он применяет физические законы, не рассуждая о них.

Но содержит ли термометр то же самое количество теплоты, что и тело человека? Конечно, нет. Чтобы пред-

---

\*) Здесь и в дальнейшем при аналогичных ссылках читатель должен учесть, что настоящая книга писалась в 1938 году. (Прим. перев.)

положить, что два тела содержат одинаковое количество теплоты именно потому, что их температуры одинаковы, следует, как заметил Блэк,

«держаться очень поспешного взгляда о предмете. Это означает смешивание количества теплоты в различных телах с ее общей силой или интенсивностью, хотя ясно, что это — неодинаковые вещи, которые всегда следует различать, когда мы рассуждаем о распределении теплоты».

Это различие становится понятным из рассмотрения очень простого эксперимента. Чтобы изменить температуру килограмма воды от комнатной температуры до точки кипения, необходимо некоторое время. Гораздо большее время требуется для нагревания двенадцати килограммов воды в том же сосуде на том же пламени. Мы истолковываем этот факт как указание на то, что теперь требуется больше «чего-то», и это «что-то» мы называем *теплотой*.

Следующее важное понятие — *удельная теплота*, получено из следующего эксперимента: пусть один сосуд содержит килограмм воды, а другой — килограмм ртути, и пусть оба нагреваются одинаковым образом. Ртуть станет горячей гораздо скорее, чем вода, тем самым показывая, что необходимо меньше «теплоты», чтобы поднять температуру ртути на один градус. Вообще говоря, для того чтобы нагреть на один градус, скажем, от четырех до пяти градусов по Цельсию, различные вещества, такие, как вода, ртуть, железо, медь, дерево и т. д., все одинаковой массы, требуются различные количества «теплоты». Мы говорим, что каждое вещество имеет свою индивидуальную *теплоемкость*, или *удельную теплоту*.

Получив понятие теплоты, мы можем исследовать его природу ближе. Пусть мы имеем два тела: одно горячее, а другое холодное, или точнее, одно тело более высокой температуры, чем другое. Установим между ними контакт и освободим их от всех других внешних влияний. Мы знаем, что в конечном итоге они достигнут одной и той же температуры. Но как это получается? Что происходит с того времени, когда они приведены в соприкосновение, до достижения ими одинаковой температуры? На ум приходит картина течения теплоты от одного тела к другому, аналогично тому, как вода течет с более высокого уровня к низшему. Эта, хотя и примитивная, картина оказывается

соответствующей многим фактам, так что можно провести аналогию:

Вода — Теплота

Более высокий уровень — Более высокая температура

Низший уровень — Низшая температура

Течение продолжается до тех пор, пока оба уровня, т. е. обе температуры, не сравниваются. Этот наивный взгляд можно сделать более полезным для количественного рассмотрения. Если смешиваются вместе определенные массы воды и спирта, каждая при определенной температуре, знание удельных теплот позволяет предсказать конечную температуру смеси. Наоборот, наблюдение конечной температуры и небольшое знание алгебры позволяют нам найти отношение двух удельных теплот.

Мы приходим к понятию теплоты, которое оказывается здесь похожим на другие физические понятия. Согласно нашему взгляду, теплота — это субстанция, такая же, как и масса в механике \*). Ее количество может либо изменяться, либо же оставаться постоянным, подобно деньгам, которые можно либо отложить в сейф, либо же истратить. Количество денег в сейфе будет оставаться неизменным до тех пор, пока сейф остается запертым; точно так же будут неизменными количества массы и теплоты в изолированном теле. Идеальный дорожный термос аналогичен такому сейфу. Больше того, как масса в изолированной системе остается неизменной, даже если имеет место химическое превращение, так же и теплота сохраняется даже в том случае, когда она переходит от одного тела к другому. Даже если теплота употребляется не на повышение температуры тела, а, скажем, на таяние льда или на превращение воды в пар, мы можем по-прежнему думать о ней как о субстанции, так как можем снова получить ее при замерзании воды или при сжижении пара. Старые названия — скрытая теплота таяния или испарения — показывают, что эти понятия получены из представления о теплоте как о субстанции. Скрытая теплота временно

---

\*) В старой русской литературе в аналогичных случаях по отношению к теплоте применялся термин «вещество». (Прим. перев.)

скрывается, подобно деньгам, положенным в сейф, но ее можно использовать, если известен запирающий механизм.

Но теплота, разумеется, не субстанция в том же смысле, как масса. Массу можно взвесить на весах, а можно ли взвесить теплоту? Весит ли кусок железа больше, когда он докрасна нагрет, по сравнению с тем, когда он холоден как лед? Эксперимент показывает, что нет. Если теплота — субстанция, то она — невесомая субстанция. «Тепловое вещество» обычно называлось *калорием* (*теплородом*); через него мы впервые знакомимся с целым семейством невесомых субстанций. Позднее мы будем иметь случай проследить историю этого семейства, его подъем и падение. Теперь же достаточно отметить зарождение отдельного члена этого семейства.

Цель всякой физической теории — объяснить максимально широкую область явлений. Она оправдывается постольку, поскольку делает события понятными. Мы видели, что субстанциональная теория теплоты объясняет много тепловых явлений. Однако скоро станет очевидным, что это опять ложная идея, что теплоту нельзя считать субстанцией, хотя бы и невесомой. Это ясно, если вспомнить о некоторых простых экспериментах, отметивших начало цивилизации.

О субстанции мы думаем, как о чем-то, что никогда не может быть ни создано, ни разрушено. Однако первобытный человек с помощью трения создал теплоту, достаточную для того, чтобы зажечь дерево. Примеры нагревания посредством трения слишком многочисленны и хорошо известны, чтобы нужно было о них рассказывать. Во всех этих случаях создается некоторое количество теплоты — факт, трудно объяснимый с точки зрения субстанциональной теории. Верно, что защитник этой теории может придумать доводы с целью объяснить этот факт. Его рассуждение должно быть приблизительно таким: «Субстанциональная теория может объяснить видимое создание теплоты. Возьмем простейший пример, когда два куска дерева трутся друг о друга. Так вот трение — это нечто такое, что воздействует на дерево и изменяет его свойства. При этом свойства изменяются так, что неизменное количество теплоты должно создавать более высокую температуру, чем прежде. В конце концов, единственное, что мы замечаем,

это — повышение температуры. Возможно, что трение изменяет теплоемкость дерева, а не общее количество теплоты.

В этой стадии обсуждения было бы бесполезным спорить с защитником субстанциональной теории; это вопрос, который может быть разрешен только экспериментально. Представим себе два одинаковых куска дерева и предположим, что температура их изменена одинаково, но различными методами: в одном случае, например, путем трения, а в другом — при помощи соприкосновения с радиатором. Если оба куска имеют одинаковую теплоемкость при новой температуре, то рушится вся субстанциональная теория. Имеются очень простые методы определения теплоемкостей, и судьба этой теории зависит от результата именно таких измерений. В истории физики часто встречаются такие испытания, которые способны произнести приговор о жизни или смерти теории; они называются *crucis* (крucис, т. е. решающими) экспериментами. Решением суда такого эксперимента может быть оправдана только одна теория явлений. Определение удельных теплоемкостей двух тел одного и того же рода при одинаковых температурах, достигнутых соответственно трением и тепловым потоком, представляет собой типичный пример решающего эксперимента. Этот эксперимент был произведен около ста сорока лет тому назад Румфордом; он нанес смертельный удар субстанциональной теории теплоты.

В докладе Румфорда мы читаем:

«Часто случается, что обычные житейские дела и занятия предоставляют нам возможности наблюдения некоторых наиболее любопытных процессов природы; очень интересные физические эксперименты нередко можно сделать без особых забот или затрат с помощью механизма, придуманного для выполнения простых механических задач в ремеслах и производстве.

У меня очень часто были случаи для подобных наблюдений, и я убеждался, что привычка быстро реагировать на все, что встречается в обычном ходе деловой жизни, приводила, так сказать, случайно или в резвых экскурсиях воображения, которые возникли под влиянием размышлений над самыми обычными явлениями, — к полезным сомнениям и разумным планам исследования и совершенствования гораздо чаще, чем все самые напряженные размышления физиков в часы, специально отведенные для научных занятий...

Недавно, будучи обязанным наблюдать за сверлением пушки на заводах военного арсенала в Мунче, я был удивлен очень значительной степенью теплоты, которую приобретала медная пушка за

короткое время сверления; еще интенсивнее (гораздо интенсивнее, чем теплота кипящей воды, как я обнаружил опытом) была теплота металлических стружек, отделенных от пушки при сверлении...

Откуда приходит теплота, фактически произведенная в вышеупомянутом механическом процессе?

Доставляется ли она металлическими стружками, которые отделяются при сверлении от твердой массы металла?

Если бы это было так, то, согласно современному учению о скрытой теплоте и о теплороде, теплоемкость их не только должна была измениться, но само изменение это должно быть достаточно велико, чтобы объяснить всю произведенную теплоту.

Но никакого такого изменения не было; я обнаружил это, взяв равные по весу количества этих стружек, а также тонких полосок той же самой металлической болванки, отделенных мелкой пилкой, и положив их при одинаковой температуре (температуре кипящей воды) в сосуды с холодной водой, взятой в одинаковых количествах (например, при температуре  $59,5^\circ$  по Фаренгейту); вода, в которую были положены стружки, судя по всему, не нагрелась больше или меньше, чем другая часть воды, в которую были положены полоски металла.

Наконец, мы подходим к выводу Румфорда:

«Обсуждая этот предмет, мы не должны забывать учета того самого замечательного обстоятельства, что источник теплоты, порожденный трением, оказался в этих экспериментах явно *неисчерпаемым*.

Совершенно необходимо добавить, что это нечто, которое любое *изолированное* тело или система тел может непрерывно поставлять *без ограничения*, не может быть *материальной субстанцией*; и мне кажется чрезвычайно трудным, если не совершенно невозможным, создать какую-либо точную идею о чем-то, что в состоянии возбуждаться и передаваться подобно тому, как возбуждается и передается в этих экспериментах теплота, если только не допустить, что это что-то есть *движение*».

Таким образом, мы видим разрушение старой теории, или, чтобы быть более точным, мы видим, что субстанциональная теория ограничивается проблемами теплового потока. И опять, как указал Румфорд, мы должны искать новые руководящие идеи. Чтобы сделать это, оставим на время проблему теплоты и вернемся к механике.

## У ВЕСЕЛИТЕЛЬНАЯ ГОРКА

Проследим за движением маленького вагона, поднятого до наиболее высокой точки волнообразной горки (рис. 18). Когда он освобождается, он начинает катиться вниз под влиянием силы тяжести, а затем поднимается

и опускается вдоль причудливо искривленной линии, заставляя пассажиров весьма остро переживать свое путешествие вследствие внезапного изменения скорости. Каждый зигзаг дорожки имеет свою наивысшую точку. Однако никогда на всем протяжении движения вагон не достигнет той же самой высоты, с которой он начал движение. Полное описание движения было бы очень сложным.

С одной стороны, это механическая проблема, так как налицо изменение скорости и положения во времени

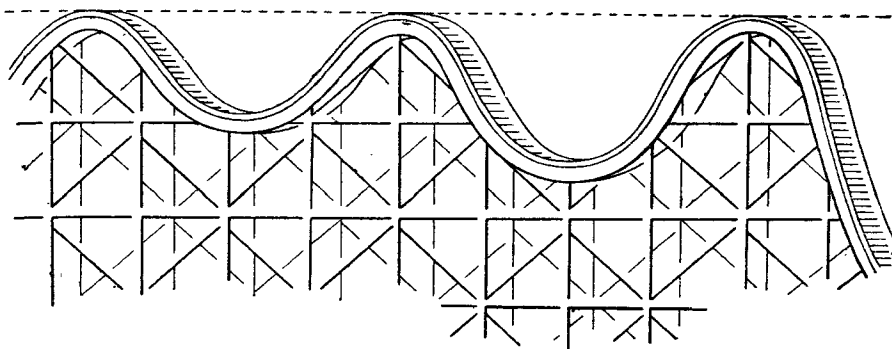


Рис. 18.

С другой стороны, имеется трение, а стало быть, образование теплоты в рельсах и колесах. Единственное существенное основание для разделения физического процесса на эти два аспекта — это возможность использовать обсужденные раньше понятия. Это разделение приводит к идеализированному эксперименту, ибо физический процесс, в котором проявляется только механический аспект, можно только вообразить, но никогда нельзя реализовать.

Для идеализированного эксперимента мы можем вообразить, что некто научился полностью исключать трение, которое всегда сопровождает движение. Он решает применить свое открытие к конструкции нового аттракциона — волнообразной горки и должен найти, как построить ее. Вагон должен пробежать вверх и вниз от своей исходной точки, скажем, на высоте тридцати метров над уровнем

земли. Учась на опыте и ошибках, он скоро узнает, что он может следовать очень простому правилу: он может построить свою горку любой формы, какую он пожелает, при условии, что ни одна точка его дорожки не лежит выше исходной. Если вагон будет двигаться без трения до самого конца горки, то на своем пути он может достигнуть высоты в тридцать метров столько раз, сколько наш конструктор пожелает, но никогда эта высота не может быть превзойдена. На реально выполнимой горке начальная высота никогда не может быть достигнута вагоном из-за трения, но наш воображаемый инженер не нуждается в рассмотрении последнего.

Проследим за движением на идеализированной горке идеализированного вагона, начинающего катиться вниз от исходной точки. Когда он движется, его расстояние от земли уменьшается, но его скорость увеличивается. Это предложение на первый взгляд напоминает нам один из уроков по языку: «У меня нет ни одного карандаша, но у вас есть шесть апельсинов». Однако оно не так глупо. Нет никакой связи между тем, что я не имею ни одного карандаша, а вы имеете шесть апельсинов, но существует очень реальное соотношение между расстоянием вагона от земли и его скоростью. Мы можем точно подсчитать скорость вагона в любой момент, если мы знаем, на какой высоте над землей он находится; мы вынуждены, однако, опустить здесь этот подсчет из-за его количественного характера, лучше всего выражаемого математической формулой.

В наивысшей точке скорость вагона равна нулю, а высота — тридцати метрам от земли. В самой низкой точке расстояние от земли равно нулю, но скорость вагона наибольшая. Эти факты можно выразить другими словами. В наивысшей точке у вагона есть *потенциальная энергия*, но нет *кинетической энергии*, или энергии движения. В самой низкой точке у вагона наибольшая кинетическая энергия, но нет никакой потенциальной энергии. Во всех промежуточных положениях, в которых имеется и некоторая скорость, и некоторое возвышение над землей, вагон имеет и кинетическую и потенциальную энергии. Потенциальная энергия увеличивается с поднятием, между тем как кинетическая энергия становится больше



по мере того, как возрастает скорость. Принципы механики достаточны для того, чтобы объяснить движение. В математической формуле находятся два выражения энергии, каждое из которых при движении меняется, хотя сумма их не изменяется. Таким образом, возможно строго математически ввести понятия потенциальной энергии, зависящей от положения, и кинетической энергии, зависящей от скорости. Введение обоих названий, конечно, произвольно и оправдывается лишь удобством. Сумма двух количеств остается неизменной и называется константой движения.

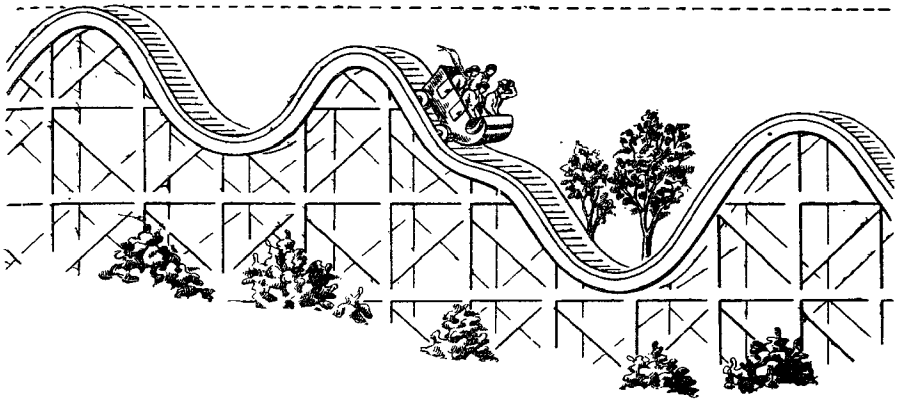


Рис. 19.

Полную энергию, кинетическую плюс потенциальную, можно сравнить, например, с деньгами, которые сохранялись неизменными по величине, но непрерывно обменивались по твердому курсу то на одну валюту, то на другую, скажем, на доллары, фунты и обратно.

В реальной горке, при движении по которой трение препятствует вагону вновь подняться до высоты исходной точки, имеет место непрерывный взаимообмен между кинетической и потенциальной энергиями. Однако здесь сумма их не остается постоянной, а становится все меньше и меньше. Теперь необходимо сделать важный и смелый шаг — поставить в связь механический и тепловой аспекты движения. Значение следствий и обобщений, сделанных из этого шага, будет видно из дальнейшего.

В этом случае в рассмотрение вовлекается нечто большее, чем кинетическая и потенциальная энергии, а именно теплота, создаваемая трением. Соответствует ли эта теплота уменьшению механической, т. е. кинетической и потенциальной, энергии? Новое предположение неизбежно. Если теплоту можно рассматривать как форму энергии, то, может быть, сумма всех трех энергий — теплоты, кинетической и потенциальной энергий — остается постоянной. Не одна теплота, а теплота и другие формы энергии, взятые вместе, неразрушимы подобно субстанции. Это похоже на то, как если бы человек, обменивая свои доллары на фунты, должен был из тех же денег заплатить франками за комиссию по обмену; общая сумма денег тоже сохраняется, так что сумма долларов, фунтов и франков представляет собой определенную величину, которую можно установить соответственно определенному курсу обмена.

Прогресс науки разрушил старое понятие теплоты как субстанции. Мы пытаемся создать новую субстанцию, энергию, одной из форм которой является теплота.

### МЕРА ПРЕВРАЩЕНИЯ

Меньше ста лет назад Майер ввел, а Джоуль экспериментально подтвердил новую идею, которая привела к понятию теплоты как формы энергии. Удивительно, что почти все фундаментальные работы о природе теплоты были сделаны не физиками-профессионалами, а людьми, которые рассматривали физику исключительно как свое любимое занятие. Это были многосторонний шотландец Блэк, немецкий врач Майер и американский предприниматель граф Румфорд, впоследствии живший в Европе, где занимался различной деятельностью и, в частности, был военным министром Баварии. Был среди них и английский пивовар Джоуль, проделавший в свободное время ряд наиболее важных экспериментов, касающихся сохранения энергии.

Джоуль экспериментально подтвердил предположение о том, что теплота — это форма энергии, и определил меру превращения.

Стоит потратить время, чтобы посмотреть, каковы были его опыты.

Кинетическая и потенциальная энергии системы составляют вместе ее *механическую* энергию. Мы предполагаем, что в случае движения вагона по увеселительной горке часть механической энергии превращается в теплоту. Если это верно, то как в этом, так и во всех других аналогичных физических процессах должна существовать определенная *мера превращения* механической энергии в тепловую (механический эквивалент теплоты). Это строго количественный вопрос, но тот факт, что данное количество механической энергии может быть превращено в определенное количество теплоты, весьма важен. Нам хотелось бы знать, каким числом выражается мера превращений, т. е. сколько теплоты мы получим из данного количества механической энергии.

Определение этого числа как раз и было предметом исследований Джоуля. Механизм одного из его экспериментов очень похож на механизм часов с гирями. Завод таких часов состоит в поднятии двух гирь, благодаря чему увеличивается потенциальная энергия системы. Если такие часы ни с чем не связаны, их можно считать замкнутой системой. Постепенно гири падают, и часы идут. По прошествии определенного времени гири достигнут своего наинизшего положения, и часы остановятся. Что произошло с энергией? Потенциальная энергия гирь превратилась в кинетическую энергию механизма, а затем постепенно рассеялась в виде теплоты.

Искусное изменение в механизме этого рода позволило Джоулю измерить тепловую потерю, а тем самым и меру превращения. В его приборе две гири вызывали вращение колеса с лопастями, помещенного в воду (рис. 20). Потенциальная энергия гирь превращалась в кинетическую энергию движущихся частиц воды, а стало быть, в теплоту, которая увеличивала температуру воды. Джоуль измерял это изменение температуры и, зная теплоемкость воды, подсчитывал количество поглощенной теплоты. Он подытожил результаты многих опытов в следующих положениях:

1. Количество теплоты, произведенной трением тел, твердых или жидких, всегда пропорционально количеству затраченной силы (силой Джоуль обозначал энергию).

2. Количество теплоты, необходимое для увеличения температуры фунта воды (взвешенной в вакууме и взятой при температуре между  $55$  и  $60^\circ$ ) на  $1^\circ$  Фаренгейта, требует для своего развития расхода механической силы (энергии), представленной падением  $772$  фунтов с высоты в один фут \*).

Другими словами, потенциальная энергия  $772$  фунтов, поднятых на один фут над землей, эквивалентна количеству теплоты, необходимой для того, чтобы поднять

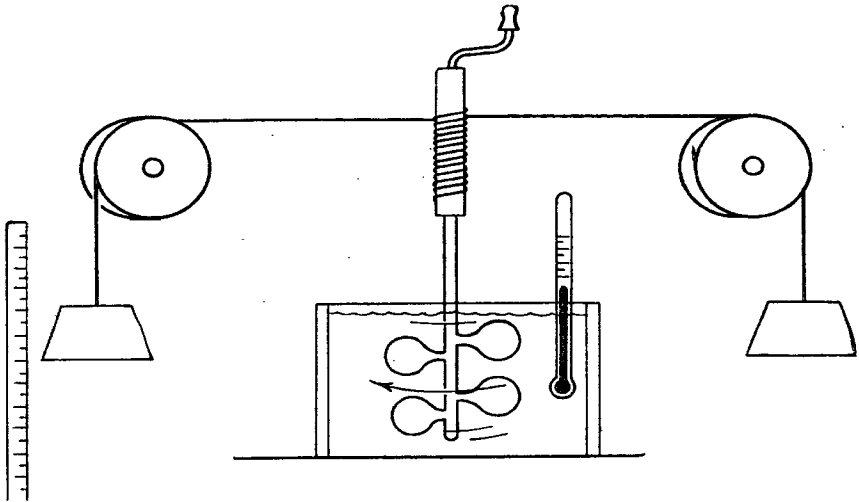


Рис. 20.

температуру одного фунта воды от  $55$  до  $56^\circ$  по шкале Фаренгейта.

Последующие эксперименты внесли несколько большую точность, но механический эквивалент теплоты — это то существенное, что Джоуль нашел в своей первоначальной работе.

\*) В переводе на метрические меры приведенное в тексте положение будет звучать так:

Количество теплоты, необходимое для увеличения температуры килограмма воды (взвешенной в вакууме и взятой при температуре между  $14$  и  $15^\circ$ ) на  $1^\circ$  по Цельсию, требует для своего развития расхода механической силы (энергии), представленной падением  $427$  килограммов с высоты одного метра. (Прим. перев.)

Поскольку эта важная работа была сделана, дальнейший прогресс шел быстро. Скоро было признано, что механическая энергия и тепловая — это только две из многих форм энергии. Все, что может быть превращено в какую-либо из этих форм, есть тоже форма энергии. Излучение, испускаемое Солнцем, есть энергия, ибо часть ее превращается на Земле в теплоту. Электрический ток обладает энергией, ибо он нагревает проводник и вращает ротор мотора. Уголь обладает химической энергией, высвобождающейся в виде теплоты во время сгорания. В каждом явлении природы одна форма энергии превращается в другую всегда при некоторой вполне определенной мере превращения. В замкнутой системе, изолированной от внешних влияний, энергия сохраняется и, следовательно, ведет себя подобно субстанции. Сумма всех возможных форм энергии в такой системе постоянна, хотя количество любого из этих видов энергии может изменяться. Если мы рассматриваем всю Вселенную как замкнутую систему, мы можем вместе с физиками девятнадцатого столетия гордо заявить, что энергия Вселенной неизменна, что никакая часть ее никогда не может быть создана или уничтожена.

В таком случае существуют два понятия субстанции: *вещество* и *энергия*. Оба подчиняются законам сохранения: масса и полная энергия изолированной системы не могут изменяться. Вещество имеет вес, а энергия невесома. Поэтому мы имеем два различных понятия и два закона сохранения. Можно ли и теперь использовать эти идеи в прежнем виде? Или эта, несомненно, хорошо обоснованная, картина изменилась в свете новейших исследований? Да, изменилась! Дальнейшие изменения в обоих понятиях связаны с теорией относительности. Мы вернемся к этому вопросу позднее.

## ФИЛОСОФСКИЕ ВОЗЗРЕНИЯ

Результаты научного исследования очень часто вызывают изменения в философских взглядах на проблемы, которые распространяются далеко за пределы ограниченных областей самой науки. Какова цель науки? Что

требуется от теории, которая стремится описать природу? Эти вопросы, хотя и выходят за пределы физики, близко связаны с ней, так как наука дает тот материал, из которого они вырастают. Философские обобщения должны основываться на научных результатах. Однако, раз возникнув и получив широкое распространение, они очень часто влияют на дальнейшее развитие научной мысли, указывая одну из многих возможных линий развития. Успешное восстание против принятого взгляда имеет своим результатом неожиданное и совершенно новое развитие, становясь источником новых философских воззрений. Эти замечания неизбежно звучат неопределенно и неостроумно до тех пор, пока они не иллюстрированы примерами, взятыми из истории физики.

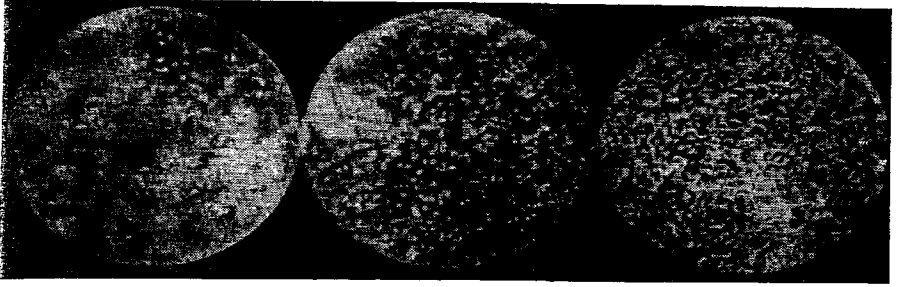
Мы постараемся здесь описать первые философские идеи о целях науки. Эти первые идеи сильно влияли на развитие физики до тех пор, пока, около ста лет назад, они не были отброшены благодаря новым данным, новым фактам и теориям, которые в свою очередь образовали новую основу для науки.

Во всей истории науки от греческой философии до современной физики имелись постоянные попытки свести внешнюю сложность естественных явлений к некоторым простым фундаментальным идеям и отношениям. Это основной принцип всей натуральной философии. Он выражен уже в работе атомистов. Двадцать три столетия назад Демокрит писал:

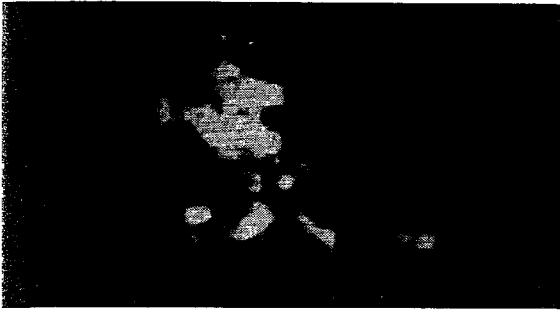
«Условно сладкое, условно горькое, условно горячее, условно холодное, условен цвет. А в действительности существуют атомы и пустота. То есть объекты чувств предполагаются реальными и в порядке вещей — рассматривать их как таковые, но на самом деле они не существуют. Реальны только атомы и пустота».

Эта идея остается в древней философии ни чем иным, как остроумным вымыслом воображения. Законы природы, устанавливающие связь следующих друг за другом событий, были неизвестны грекам. Наука, связывающая теорию и эксперимент, фактически началась с работ Галилея. Мы проследили за первыми шагами ее развития, приводящими к законам движения. На протяжении двухсот лет научного исследования сила и материя были основными

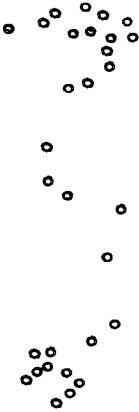
# ВКЛЕЙКА I



Броуновские частицы, видимые через микроскоп. (Сфотографировано Ж. Перреном.)



Одна броуновская частица, сфотографированная с длительной выдержкой. (Сфотографировано Брумбергом и Вавиловым.)



Последовательные положения, наблюдаемые для одной из броуновских частиц.



Путь, выведенный из этих последовательных положений.





понятиями во всех попытках понять природу. Невозможно представить себе одно без другого, ибо материя обнаруживает свое существование в качестве источника силы благодаря ее действию на другую материю.

Рассмотрим простейший пример: две частицы, между которыми действуют силы. Легче всего представить себе силы притяжения и отталкивания. В обоих случаях векторы сил лежат на линии, соединяющей материальные точки (рис. 21). Требование простоты приводит нас к картине частиц, притягивающих или отталкивающих друг друга; любое другое предположение о направлении действующих сил привело бы к гораздо более сложной картине. Можем ли мы сделать столь же простое предположение о длине векторов сил? Если мы пожелаем избежать слишком специальных предположений, мы можем высказать одно соображение: сила, действующая между двумя данными частицами, зависит только от расстояния между ними, подобно силам тяготения. Это предположение кажется довольно простым. Можно было бы представить гораздо более сложные силы, например зависящие не только от расстояния, но и от скоростей обеих частиц. С материей и силой в качестве основных понятий мы едва ли можем связать более простые предположения, чем те, что силы действуют вдоль линии, связывающей частицы, и зависят только от расстояния. Но возможно ли описать все физические явления с помощью сил только этого рода?



Рис. 21.

Огромные достижения механики во всех ее ветвях, ее поразительный успех в развитии астрономии, приложение ее идей к проблемам, по-видимому, отличным от механических по своему характеру, — все это способствовало развитию уверенности в том, что с помощью простых сил, действующих между неизменными объектами, можно описать все явления природы. На протяжении двух столетий, последовавших за временем Галилея, такая попытка, сознательная или бессознательная, проявляется почти во всех научных трудах.

Особенно ясно ее сформулировал Гельмгольц около середины девятнадцатого столетия:

«Следовательно, конечную задачу физической науки мы видим в том, чтобы свести физические явления к неизменным силам притяжения или отталкивания, величина которых целиком зависит от расстояния. Разрешимость этой задачи есть условие полного понимания природы».

Таким образом, линия развития науки согласно Гельмгольцу определена и следует строго установленному курсу:

«Ее призвание будет выполнено по мере того, как будет выполнено сведение явлений природы к простым силам и будет доказано, что это единственно возможное сведение, которое допускают явления».

Физику двадцатого столетия это воззрение представляется недалеким и наивным. Ему страшно было бы подумать, что величайшие успехи исследования могли бы скоро закончиться, перестав возбуждать умы, если бы непогрешимая картина строения Вселенной была установлена на все времена.

Хотя эти догматы сводили бы описание всех событий к простым силам, они оставляли открытым вопрос о точной зависимости сил от расстояния. Возможно, что для различных явлений эта зависимость различна. Необходимость введения многих различных видов сил для различных событий, конечно, неудовлетворительна с философской точки зрения. Тем не менее, это так называемое *механистическое воззрение*, наиболее ясно сформулированное Гельмгольцем, сыграло в свое время важную роль. Развитие кинетической теории вещества есть одно из величайших достижений науки, непосредственно вызванное механистическим воззрением.

Прежде чем показать его упадок, временно станем на ту точку зрения, которой придерживались физики прошлого столетия, и посмотрим, какие заключения мы можем вывести из этой картины внешнего мира.

## КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ВЕЩЕСТВА

Возможно ли объяснить тепловые явления в терминах, относящихся к движению частиц, взаимодействующих между собой с помощью простых сил? Пусть замкнутый сосуд содержит определенную массу газа, например воз-

духа, при определенной температуре. Нагревая воздух, мы поднимаем его температуру и таким образом увеличиваем энергию. Но как эта теплота связана с движением? Возможность такой связи внушается нам и нашим догматически принятым философским воззрением и тем, что теплота порождается движением. Теплота должна представлять собой механическую энергию, если всякая проблема есть механическая проблема. Задача *кинетической теории* состоит в том, чтобы представить понятие материи именно таким путем. Согласно этой теории газ есть совокупность огромного числа частиц, или *молекул*, движущихся во всех направлениях, соударяющихся друг с другом и изменяющих свое направление движения после каждого столкновения. В таком газе должна существовать средняя скорость молекул, подобно тому как в большом человеческом обществе существует средний возраст или средний доход. Поэтому должна существовать также и средняя кинетическая энергия частицы. Чем больше теплоты в данном сосуде, тем больше средняя кинетическая энергия.

Таким образом, согласно этой картине теплота не является специфической формой энергии, отличной от механической, а она есть не что иное, как именно кинетическая энергия молекулярного движения. Любой определенной температуре соответствует определенная средняя кинетическая энергия молекулы. В самом деле, это не произвольное предположение. Мы вынуждены рассматривать кинетическую энергию молекулы как меру температуры газа, если мы хотим создать последовательную механистическую картину строения вещества.

Эта картина — нечто большее, чем игра воображения. Можно показать, что кинетическая теория газов не только находится в согласии с экспериментом, но и действительно приводит к более глубокому пониманию фактов. Это можно проиллюстрировать несколькими примерами.

Пусть мы имеем сосуд, закрытый поршнем, который может свободно двигаться (рис. 22). Сосуд содержит определенное количество газа, который должен сохраняться при неизменной температуре. Если поршень вначале покоится в некотором положении, то его можно поднять вверх, снимая нагрузку, или, добавляя ее, опустить. Чтобы

сдвинуть поршень вниз, нужно употребить силу, действующую против внутреннего давления газа. Каков механизм этого внутреннего давления согласно кинетической теории? Огромное число частиц, составляющих газ, движется во всех направлениях. Они бомбардируют все стенки и поршень, отскакивая назад, подобно мячам, брошенным в стену. Эта непрерывная бомбардировка большого числа частиц поддерживает поршень на определенной высоте, сопротивляясь силе тяжести, действующей по направлению вниз на поршень и нагрузку.

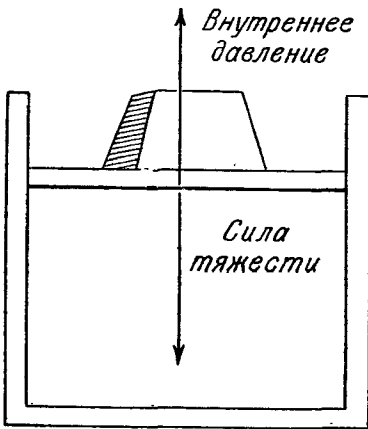


Рис. 22.

В одном направлении действует постоянная сила тяготения, а в другом — очень много беспорядочных ударов молекул. Конечный результат действия на поршень всех этих малых беспорядочных сил должен быть равен результату действия силы тяготения, если сохраняется равновесие.

Предположим, что поршень сдвинули вниз так, что он сжал газ до некоторой части его первоначального объема, скажем, до половины, а температура его осталась неизменной. Что должны мы ожидать в этом

случае согласно кинетической теории? Будет ли сила, исходящая от бомбардировки молекул, эффективнее, чем прежде, или нет? Теперь частицы заполняют сосуд теснее, чем прежде. Хотя средняя кинетическая энергия по-прежнему та же самая, удары частиц о поршень теперь происходят чаще, а стало быть, полная сила будет больше. Из этой картины, представленной кинетической теорией, ясно, что для того чтобы удержать поршень в его нижнем положении, требуется большая нагрузка. Этот простой экспериментальный факт хорошо известен, но предсказание его логически вытекает из кинетического взгляда на материю.

Рассмотрим другой эксперимент. Возьмем два сосуда, содержащих одинаковые объемы различных газов, скажем,

водорода и азота, оба при одинаковой температуре. Предположим, что оба сосуда закрыты одинаковыми поршнями, на которых наложены равные нагрузки. Короче говоря, это означает, что оба газа имеют равные объемы, температуру и давление. Так как температура одинакова, то согласно теории такова же и средняя кинетическая энергия частиц. Так как давления одинаковы, то оба поршня бомбардируются с одной и той же общей силой. В среднем каждая частица обладает одной и той же энергией, а оба сосуда имеют равный объем. Поэтому, хотя газы химически и различны, *число молекул в каждом сосуде должно быть одинаковым*. Этот результат очень важен для понимания многих химических явлений. Он означает, что число молекул в данном объеме при определенной температуре и давлении есть нечто такое, что характеризует не какой-либо отдельный газ, а все газы. Наиболее изумительно то, что кинетическая теория не только предсказывает существование такого универсального числа, но и позволяет нам определить его. К этому вопросу мы скоро вернемся.

Кинетическая теория вещества объясняет как количественно, так и качественно, законы газов, найденные с помощью эксперимента. Более того, теория не ограничивается газами, хотя ее наибольшие успехи были достигнуты в этой области.

Газ можно довести до сжижения понижением его температуры. Падение температуры вещества означает уменьшение средней кинетической энергии его частиц. Поэтому ясно, что средняя кинетическая энергия частиц жидкости меньше, чем средняя кинетическая энергия частиц соответствующего газа.

Поразительная демонстрация движения частиц в жидкостях была впервые дана так называемым *броуновским движением*, замечательным явлением которое осталось бы совершенно таинственным и непонятным без кинетической теории вещества. Оно было впервые наблюденно ботаником Броуном, а объяснено лишь спустя восемьдесят лет, в начале этого столетия. Единственный прибор, необходимый для наблюдения броуновского движения, — это микроскоп, притом даже не особенно хорошего качества.

Броун работал с частицами пылицы некоторых растений, т. е., по его словам,

«частицами размером от одной четырехтысячной до одной пяти-тысячной доли дюйма в длину».

Далее он рассказывает:

«Проверяя формы этих частиц, погруженных в воду, я наблюдал многие из них в явном движении... Эти движения были таковы, что после многих повторных наблюдений я убедился в том, что они возникают не от потоков в жидкости и не от ее постепенного испарения, а принадлежат самим частицам».

То, что наблюдал Броун, было непрерывным колебанием частиц, взвешенных в воде и наблюдаемых в микроскоп. Это поразительное зрелище!

Существен ли выбор отдельных растений для наблюдаемого явления? Чтобы ответить на этот вопрос, Броун повторил эксперимент со многими различными растениями и нашел, что все частицы, взвешенные в воде, обнаруживают такое же движение, если только они достаточно малы. Больше того, он обнаружил тот же вид неугомного, беспорядочного движения у очень малых частиц как органических, так и неорганических веществ. Даже с распыленными кусочками камня он наблюдал такие же явления! (См. фото на вклейке I.)

Как можно объяснить это движение? Кажется, что оно противоречит всему прежнему опыту. Наблюдение положения одной взвешенной частицы, произведенное через, скажем, каждые тридцать секунд, обнаруживает фантастическую форму ее пути. Удивительно то, что ее движение, по-видимому, имеет характер вечного движения. Колеблющийся маятник, помещенный в воду, скоро остановится, если только он не будет толкаться некоторой внешней силой. Существование никогда не ослабляющегося движения кажется противоречащим всему предыдущему опыту. Эта трудность была блестяще объяснена кинетической теорией материи.

Если мы будем рассматривать воду даже через самый мощный микроскоп, мы не можем увидеть молекул и их движения, нарисованного нам кинетической теорией материи. Из этого можно заключить, что если представление о воде как о совокупности частиц и правильно, то величина

этих частиц лежит за пределами видимости самых лучших микроскопов. Тем не менее останемся верными теории и предположим, что она представляет последовательную картину реальности. Броуновские частицы, видимые в микроскоп, бомбардируются меньшими частицами, составляющими воду. Если бомбардируемые частицы достаточно малы, то возникает броуновское движение. Оно возникает потому, что эта бомбардировка неодинакова со всех сторон и не может быть уравновешена в силу своего хаотического и случайного характера. Таким образом, наблюдаемое движение есть результат движения ненаблюдаемого. Поведение больших частиц отражает некоторым образом поведение молекул, составляя, так сказать, увеличение столь большое, что оно становится видимым через микроскоп. Хаотичный и случайный характер пути броуновских частиц отражает хаотичность пути меньших частиц, которые составляют вещество. Из сказанного мы можем заключить, что количественное изучение броуновского движения может дать нам более глубокое проникновение в кинетическую теорию вещества. Ясно, что видимое броуновское движение зависит от величины невидимых бомбардирующих молекул. Броуновского движения не было бы вовсе, если бы бомбардирующие молекулы не обладали определенным количеством энергии или, другими словами, если бы они не имели массы и скорости. Поэтому неудивительно, что изучение броуновского движения может привести к определению массы молекулы.

Благодаря трудолюбивому исследованию, и теоретическому, и экспериментальному, были получены количественные результаты кинетической теории. Идея, возникшая при изучении броуновского движения, была одной из тех, которая привела к количественным данным. Одни и те же данные могут быть получены различными путями, исходя из совершенно различных предположений. Тот факт, что все эти методы являются опорой одного и того же воззрения, очень важен, ибо это показывает внутреннюю последовательность кинетической теории вещества.

Здесь мы напомним лишь один из многих результатов, достигнутых экспериментом и теорией. Предположим, что

мы имеем один грамм самого легкого из всех элементов — водорода — и спрашиваем: сколько частиц в этом грамме? Ответ будет характеризовать не только водород, но и все другие газы, так как мы уже знаем, при каких условиях два газа имеют одинаковое число частиц.

Теория позволяет нам ответить на этот вопрос, исходя из известных измерений броуновского движения взвешенных частиц. Ответ представляет собой поразительно большое число: тройка, за которой следует двадцать три других цифры. Число молекул в одном грамме водорода таково:

303 000 000 000 000 000 000 000.

Вообразим, что молекулы грамма водорода так возросли по своей величине, что стали видимыми через микроскоп, а их диаметр достиг одной двухтысячной сантиметра, т.е. таков же, как и диаметр броуновских частиц. Тогда, для того чтобы тесно уложить их друг возле друга, мы должны были бы взять ящик, каждая сторона которого имеет длину около половины километра!

Мы легко можем подсчитать массу одной водородной молекулы, разделив единицу на вышеуказанное число. Ответ дает фантастически малое число:

0, 000 000 000 000 000 000 000 003 3 грамма,

представляющее массу молекулы водорода.

Эксперименты с броуновским движением являются лишь одними из многих независимых экспериментов, приводящих к определению этого числа, играющего чрезвычайно важную роль в физике.

В кинетической теории материи и во всех ее важных достижениях мы видим осуществление общей философской программы: свести объяснение всех явлений к механическому взаимодействию между частицами материи.

*Подведем итоги:*

*В механике будущий путь движущегося тела может быть предсказан, а его прошлое может быть раскрыто, если известны для данного момента условия движения тела и действующие на него силы. Так, например, могут быть предсказаны будущие пути всех планет. Действую-*



*щие на них силы суть ньютоновы силы тяготения, зависящие только от расстояния. Огромные результаты классической механики внушают нам мысль, что механистическое воззрение можно последовательно применить ко всем ветвям физики, что все явления можно объяснить действием сил, представляющих собой притяжение или отталкивание, зависящих только от расстояния и действующих между неизменными частицами.*

*В кинетической теории вещества мы видим, как это воззрение, возникающее из механических проблем, охватывает явления теплоты и как оно приводит к преуспевающей картине строения вещества.*

## II. УПАДОК МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

---

*Две электрические жидкости.— Магнитные жидкости.— Первая серьезная трудность.— Скорость света.— Свет как субстанция.— Загадка цвета.— Что такое волна? — Волновая теория света.— Продольны или поперечны световые волны? — Эфир и механистическое воззрение.*

### ДВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

Последующие страницы содержат скучный отчет о некоторых очень простых экспериментах. Отчет будет скучным не только потому, что описание экспериментов неинтересно по сравнению с самим осуществлением их, но и потому, что самый смысл экспериментов не очевиден до тех пор, пока его не выяснит теория. Наша цель состоит в том, чтобы показать яркий пример, характеризующий роль теории в физике.

1. Пусть металлический стержень укреплен на стеклянной подставке, а концы стержня связаны с помощью металлических проводников с электроскопом. Что такое электроскоп? Это простой прибор, который в основном состоит из двух листочков золотой фольги, подвешенных на конце короткого металлического стержня. Они заключены в стеклянную банку или бутылку, так что металл находится в контакте только с неметаллическими телами, называемыми изоляторами. Кроме электроскопа и металлического стержня, в нашем распоряжении имеются твердая каучуковая палочка и кусок фланели.

До осуществления эксперимента обратим внимание на то, висят ли листочки сомкнутыми вместе, ибо это их нормальное положение, или нет. Если они случайно не сомкнуты, то прикосновение пальца к металлическому стержню сведет их вместе. После того как эти предварительные мероприятия проделаны, каучуковая палочка энергично натирается фланелью и приводится в соприкосновение с металлом. Листочки сразу же разойдутся друг от друга. Они остаются в таком положении даже после

того, как каучуковая палочка будет отодвинута в сторону (рис. 23).

2. Продеваем другой эксперимент, используя те же приборы, что и раньше, но предварительно приведя листочки электроскопа в прежнее положение, когда они свободно висят, касаясь друг друга. Сейчас мы не будем касаться каучуковой палочкой металлического стержня,

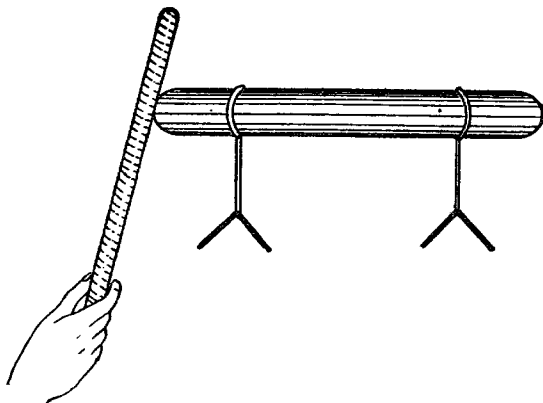


Рис. 23.

а только поднесем ее близко к металлу. Листочки электроскопа опять разделяются. Но сейчас это разделение оказывается иным. Когда каучуковая палочка удаляется, совсем не коснувшись металла, листочки вместо того, чтобы оставаться разделенными, немедленно спадают, возвращаясь к своему нормальному положению.

3. Для третьего эксперимента слегка изменим приборы. Предположим, что металлический стержень состоит из двух кусков, соединенных вместе. Мы натираем каучуковую палочку фланелью и снова подносим ее близко к металлу. Происходит то же явление — листочки разделяются. Но теперь мы сначала отделим части металлического стержня друг от друга и только после этого удалим каучуковую палочку. Мы замечаем, что в этом случае листочки остаются разделенными, а не спадают до своего нормального положения, как это было во втором эксперименте (рис. 24).

Едва ли эти простые и наивные эксперименты могут возбудить живейший интерес или энтузиазм. В средние века тот, кто их осуществлял, был бы, вероятно, осужден; нам они кажутся и скучными и нелогичными. Было бы очень трудно, не смущаясь, повторить их после чтения сухого отчета об их выполнении. Некоторые теоретические рассуждения, однако, делают их понятными. Мы могли бы сказать больше: едва ли возможно представить себе такие

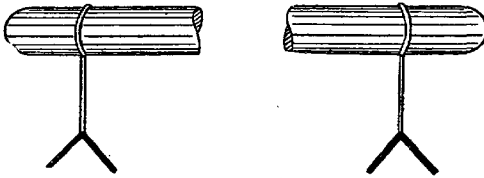


Рис. 24.

эксперименты как осуществление случайной игры воображения, без предварительно существовавших более или менее определенных идей об их значении.

Теперь мы укажем идеи, лежащие в основе очень простой и наивной теории, объясняющей все описанные факты.

Существуют две *электрические жидкости*, одна называется *положительной* (+), а другая — *отрицательной* (—). Они подобны субстанции в уже разъясненном смысле: ее величина может возрастать или убывать, но общая сумма сохраняется в любой изолированной системе. Имеется, однако, существенное отличие между этим случаем и случаем с теплотой, веществом или энергией. Мы имеем две электрические субстанции. Здесь невозможно применение предыдущей аналогии с деньгами, если не сделать некоторого обобщения. Тело электрически нейтрально, если положительная и отрицательная электрические жидкости полностью уничтожают друг друга. Человек ничего не имеет или потому, что у него действительно ничего нет, или потому, что сумма денег, отложенных в его сейфе, в точности равна сумме его долгов. С двумя родами электрических жидкостей мы можем сравнить дебет и кредит в бухгалтерских книгах.

Далее, теория полагает, что обе электрические жидкости одинакового рода отталкивают друг друга, в то время как обе жидкости противоположного рода притягивают. Это можно представить графически следующим образом (рис. 25).

Необходимо последнее теоретическое предположение. Имеется два вида тел: тела, в которых жидкости могут двигаться свободно, — так называемые *проводники*, и тела, в которых они не могут двигаться, — так называемые *изоляторы*. Как всегда бывает в таких случаях, это деление тел на два вида нельзя рассматривать слишком строго. Идеальный проводник, как и идеальный изолятор, — это абстракции, которые никогда не могут быть реализованы. Металлы, земля, человеческое тело — все это примеры проводников, хотя и неодинакового качества. Стекло, резина, фарфор и им подобные тела — это изоляторы. Воздух лишь частично является изолятором, как это знает тот, кто видел описанные эксперименты. Плохие результаты электростатических экспериментов часто объясняются влажностью воздуха, увеличивающей его проводимость.

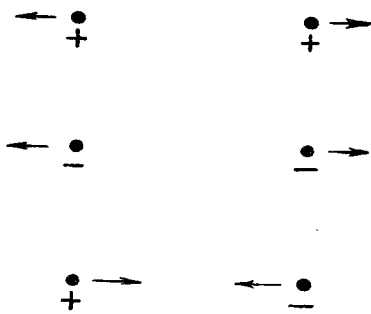


Рис. 25.

Эти теоретические положения достаточны для объяснения трех описанных экспериментов. Мы рассмотрим их еще раз в том же порядке, как и раньше, но в свете теории электрических жидкостей.

1. Каучуковая палочка, как и все другие тела при нормальных условиях, электрически нейтральна. Она содержит обе жидкости, положительную и отрицательную, в равных количествах. Трением о фланель мы разделяем их. Это утверждение чисто условно, ибо это есть приложение терминологии, созданной теорией, к описанию процесса трения. Тот вид электричества, который каучуковая палочка имеет в избытке, впоследствии был назван отрицательным, — название, которое, конечно, является лишь делом соглашения. Если бы эксперименты были осуществлены со стеклянной палочкой, натертой кошачьим мехом, мы должны были бы назвать избыток электричества на ней положительным, чтобы не противоречить уже принятым положениям. Но продолжим рассказ. Мы передаем электрическую жидкость металлическому

проводнику, касаясь его каучуком. В этом проводнике она движется свободно, распространяясь по всему металлу, включая и золотые листочки. Так как отрицательные жидкости взаимно отталкиваются, то оба листочка стремятся удалиться друг от друга, насколько это возможно, в результате чего и наблюдается их разделение. Металл покоится на стеклянной подставке или каком-либо ином изоляторе, так что электрическая жидкость остается на проводнике, поскольку это допускает слабая проводимость воздуха. Теперь мы понимаем, почему мы должны коснуться металла пальцем в начале эксперимента. В этом случае металл, человеческое тело и земля составляют один большой проводник, по которому электрическая жидкость разливается так, что практически на электрооскопе ничего не остается.

2. Второй эксперимент начинается так же, как и первый. Но теперь каучук не касается металла, а лишь подносится к нему. Обе жидкости в проводнике, имея возможность свободно двигаться, разделяются; одна притягивается к палочке, а другая отталкивается. Они вновь смешиваются, когда каучуковый стержень удаляется, так как жидкости противоположного рода притягивают друг друга.

3. Затем в присутствии натертой каучуковой палочки мы разделяем металлический стержень на две части и, наконец, удаляем палочку. В этом случае после удаления каучуковой палочки обе жидкости не смешиваются, так что золотые листочки сохраняют избыток одной электрической жидкости и остаются разделенными.

В свете этой простой теории все упомянутые здесь факты кажутся понятными. Та же теория дает больше, позволяя нам понять не только эти, но и многие другие «факты» в области «электростатики». Цель всякой теории — вести нас к новым фактам, наводить на мысль о новых экспериментах и приводить к открытию новых явлений и новых законов. Пример сделает это ясным. Представим себе изменение во втором эксперименте. Предположим, что я оставляю каучуковую палочку возле металла и в то же время касаюсь металла своим пальцем (рис. 26). Что теперь случится? Теория дает ответ: отталкиваемая палочкой отрицательная (—) жидкость теперь может

удалиться через мое тело, так что в результате в металлическом стержне остается только одна жидкость, положительная (+). Листочки электроскопа остаются разделенными. И действительно, эксперимент подтверждает это предсказание.

Теория, о которой мы сейчас рассказываем, конечно, наивна и не совпадает с точкой зрения современной физики. Тем не менее это хороший пример, показывающий характерные черты всякой физической теории.

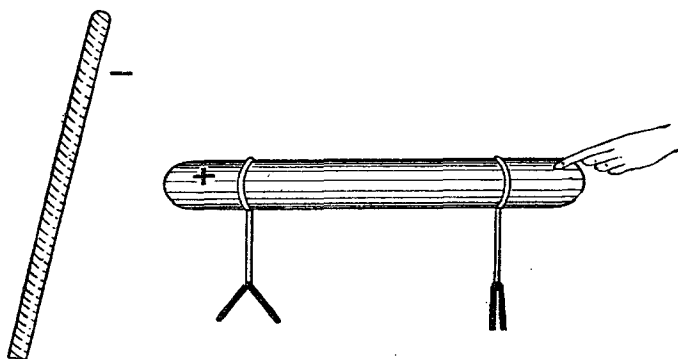


Рис. 26.

В науке нет вечных теорий. Всегда происходит так, что некоторые факты, предсказанные теорией, опровергаются экспериментом. Всякая теория имеет свой период постепенного развития и триумфа, после которого она может испытать быстрый упадок. Подъем и падение субстанциональной теории теплоты, уже обсуждавшиеся здесь, являются одним из многих возможных примеров. Другие примеры, более глубокие и важные, будут обсуждаться позднее. Почти всякий большой успех в науке возникает из кризиса старой теории как результат попытки найти выход из создавшихся трудностей. Мы должны проверять старые идеи, старые теории, хотя они и принадлежат прошлому, ибо это — единственное средство понять значительность новых идей и пределы их справедливости.

На первых страницах нашей книги мы сравнивали роль исследователя с ролью детектива, который, собрав

необходимые факты, находит правильное решение посредством чистого мышления. В одном весьма существенном отношении это сравнение следует считать чрезвычайно поверхностным. И в жизни, и в детективных новеллах преступление дано. Детектив должен просмотреть письма, отпечатки пальцев, пули, ружья, но, по крайней мере, он знает, что убийство совершилось. Для ученого дело обстоит не так. Было бы нетрудно представить себе человека, который абсолютно ничего не знает об электричестве; все древние довольно счастливо жили, ничего не зная о нем. Пусть этому человеку будет дан металл, золотой листок, бутылки, каучуковая палочка, фланель, словом все материалы, необходимые для осуществления трех наших экспериментов. Он может быть очень культурным лицом, но он, вероятно, нальет в бутылки вино, использует фланель для чистки и никогда не проникнется вдруг идеей о том, чтобы проделать те эксперименты, которые мы описали. Для детектива факт преступления дан, и задача формулируется так: кто убил Кука Робина? Ученый должен, по крайней мере отчасти, сам совершить преступление, затем довести до конца исследование. Более того, его задача состоит в том, чтобы объяснить не один только данный случай, а все связанные с ним явления, которые происходили или могут еще произойти.

В факте введения понятия жидкостей мы видим влияние тех механистических идей, которые стремятся все объяснить с помощью субстанций и простых сил, действующих между ними. Чтобы увидеть, можно ли механистическую точку зрения применить к описанию электрических явлений, мы должны рассмотреть следующую проблему. Пусть даны два небольших шара, имеющих электрический заряд, то есть несущих избыток какой-то одной электрической жидкости. Мы знаем, что шары будут либо притягивать, либо отталкивать друг друга. Но зависит ли сила только от расстояния и если да, то как? Самым простым будет предположение, что эта сила зависит от расстояния так же, как и сила тяготения, которая уменьшается, скажем, до одной девятой своей первоначальной величины, если расстояние увеличивается в три раза. Эксперименты, проделанные Кулоном, по-



казали, что этот закон действительно справедлив. Спустя сто лет после того, как Ньютон открыл закон тяготения, Кулон обнаружил такую же зависимость электрической силы от расстояния. Но закон Ньютона и закон Кулона существенно различаются в следующих двух отношениях. Гравитационное притяжение существует всегда, в то время как электрические силы существуют только в том случае, если тела обладают электрическими зарядами. В законе тяготения имеется только притяжение, а электрические силы могут как притягивать, так и отталкивать.

Здесь возникает тот же самый вопрос, который мы рассматривали в связи с теплотой. Являются ли электрические жидкости невесомыми субстанциями или нет? Другими словами, будет ли вес куска металла одинаков, когда он нейтрален и когда он заряжен? Весы никакого различия не обнаруживают. Мы заключаем, что электрические жидкости тоже являются членами семейства невесомых субстанций.

Дальнейший прогресс в теории электричества требует введения двух понятий. Мы опять будем избегать строгих определений, используя вместо них аналогии с уже известными понятиями. Мы помним, как существенно было для понимания тепловых явлений различать между самой теплотой и температурой. Равным образом и здесь важно различать электрический потенциал и электрический заряд. Различие между обоими понятиями станет ясным из следующей аналогии:

Электрический потенциал — Температура  
Электрический заряд — Теплота

Два проводника, например два шара различной величины, могут иметь одинаковый заряд, т. е. одинаковый избыток электрической жидкости, но потенциал будет различным в обоих случаях, а именно: он выше для меньшего шара и ниже для большего. Электрическая жидкость будет иметь большую плотность и, стало быть, будет более сжата на малом проводнике. Так как отталкивательные силы должны с плотностью возрастать, то тенденция заряда улечувиваться будет больше в меньшем шаре, чем в большем. Эта тенденция заряда убежать с проводника

есть непосредственное выражение его потенциала. Чтобы ясно показать различие между зарядом и потенциалом, мы сформулируем несколько предложений, описывающих поведение нагретых тел, и соответствующие им предложения, касающиеся заряженных проводников.

### Теплота

Два тела, имеющих вначале различную температуру, спустя некоторое время после того, как они приведены в соприкосновение, достигают одной и той же температуры.

Равные количества теплоты производят различные изменения температуры в двух телах, если теплоемкости этих тел различны.

Термометр, находящийся в контакте с каким-либо телом, длиной своего ртутного столбика показывает свою собственную температуру, а вместе с тем и температуру тела.

Но такую аналогию нельзя продолжать слишком далеко. Следующий пример показывает как сходство, так и различие. Если горячее тело приведено в контакт с холодным, то теплота течет от горячего к холодному телу. Предположим, с другой стороны, что мы имеем два изолированных проводника, имеющих равные, но противоположные заряды, положительный и отрицательный. Оба — при разных потенциалах. Согласились считать потенциал,

### Электричество

Два изолированных проводника, имеющих вначале различные электрические потенциалы, очень скоро после того, как они приведены в соприкосновение, достигают одного и того же потенциала.

Равные величины электрических зарядов производят различные изменения электрических потенциалов в двух телах, если электрические емкости тел различны.

Электроскоп, находящийся в контакте с каким-либо проводником, разделением золотых листочков показывает свой собственный электрический потенциал, а вместе с тем и электрический потенциал проводника.

соответствующий отрицательному заряду, более низким, чем потенциал, соответствующий положительному. Если оба проводника сдвинуты до соприкосновения друг с другом или соединены проволокой, то из теории электрических жидкостей следует, что они не покажут никакого заряда, а это означает, что никакой разности электрических потенциалов нет вовсе. Мы должны представить себе, что «течение» электрического заряда от одного проводника к другому совершается за очень короткое время, в течение которого разность потенциалов уравнивается. Но как это происходит? Течет ли положительная жидкость к отрицательно заряженному телу или отрицательная — к положительно заряженному?

В фактах, которые здесь разбирались, мы не видели никакого основания для решения этого вопроса. Мы можем предположить осуществляющейся либо одну из этих возможностей, либо и ту и другую, считая, что течение электричества совершается одновременно в обоих направлениях.

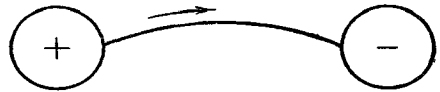


Рис. 27.

Этот вопрос лишь о том, какое принять соглашение, и нельзя придавать значения выбору, ибо мы знаем, что нет никакой возможности экспериментально решить этот вопрос. Дальнейшее развитие, ведущее к гораздо более глубокой теории электричества, дало разрешение этой проблемы, которая совершенно бессмысленна, пока она сформулирована в пределах примитивной теории электрических жидкостей. В дальнейшем мы будем придерживаться следующего способа выражения: электрические жидкости текут от проводника с более высоким потенциалом к проводнику с более низким потенциалом. Таким образом в случае наших двух проводников электричество течет от положительно заряженного проводника к отрицательно заряженному. Это выражение — исключительно дело соглашения и с этой точки зрения совершенно произвольно.

Все эти затруднения показывают, что аналогия между теплотой и электричеством ни в коем случае не является полной.

Мы видели, какова возможность приспособления механистического воззрения к описанию элементарных фактов электростатики. То же самое возможно и в отношении магнитных явлений.

### МАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ

Мы будем поступать здесь так же, как и раньше: начинать с очень простых фактов, а затем отыскивать их теоретическое объяснение.

1. Пусть у нас имеются два длинных магнита; один из них уравновешен так, что он занимает горизонтальное положение, а другой мы возьмем в руку.

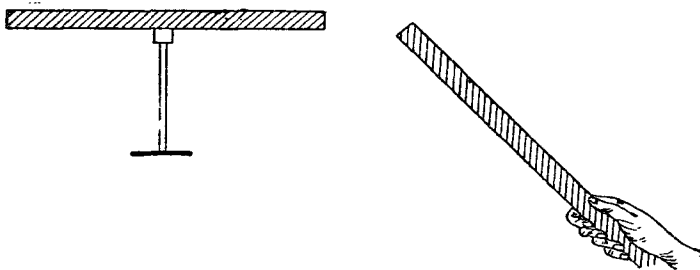


Рис. 28

Если концы обоих магнитов поднести друг к другу, то между ними обнаруживается сильное притяжение (рис. 28). Этого всегда можно достигнуть. Если притяжение не имеет места, мы должны повернуть магнит и попробовать другой конец. Концы магнитов называются их *полюсами*. Продолжая эксперимент, мы двигаем полюс магнита, который держим в руке, вдоль другого магнита. При этом наблюдается уменьшение притяжения, а когда полюс достигает середины уравновешенного магнита, то вообще никакого проявления сил нет. Если полюс движется дальше в том же направлении, то наблюдается отталкивание, достигающее наибольшей силы у второго полюса уравновешенного магнита.

2. Приведенный выше пример наводит на следующую мысль. Каждый магнит имеет два полюса. Нельзя ли изо-

лизовать один из них? Осуществление этой идеи кажется очень простым, а именно: разломить магнит на две равные части. Мы видели, что никакого взаимодействия между полюсом одного магнита и серединой другого магнита нет. Но если мы действительно разломим магнит, то результат окажется весьма удивительным и неожиданным. Если мы повторим эксперимент, описанный под номером 1, но теперь лишь с половиной уравновешенного магнита, то результаты будут совершенно те же самые, как и раньше. Там, где раньше не было никакого следа магнитной силы, теперь находится сильный полюс.

Как следует объяснить эти факты? Мы можем попробовать набросать теорию магнетизма, аналогичную теории электрических жидкостей. Это внушено тем обстоятельством, что здесь, как и в электростатических явлениях, мы

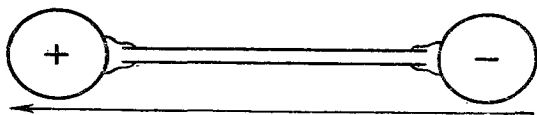


Рис. 29.

имеем и притяжение, и отталкивание. Вообразим себе два проводника в форме шаров, обладающих равными зарядами, один — положительным, а другой — отрицательным. Здесь слово «равные» означает величины, имеющие одинаковое абсолютное значение: например,  $+5$  и  $-5$  имеют одинаковое абсолютное значение. Предположим, что шары связаны посредством изолятора, например стеклянного стержня. Схематически это устройство может быть представлено стрелкой, направленной от отрицательно заряженного проводника к положительно заряженному. Мы назовем это электрическим диполем (рис. 29). Ясно, что два таких диполя вели бы себя совершенно так же, как и магнитные стержни в эксперименте 1. Если мы рассматриваем наше изобретение как модель реального магнита, мы можем сказать, предполагая существование магнитных жидкостей, что магнит — это не что иное, как магнитный диполь, имеющий на своих концах две жидкости разных родов. Эта простая теория, подражающая теории электричества, вполне подходит для объяс-

нения первого эксперимента. По этой теории должно быть притяжение на одном конце, отталкивание на другом и уравнивание равных и противоположных сил в середине. Но как обстоит дело со вторым экспериментом? Разламывая стеклянный стержень электрического диполя, мы получаем два изолированных полюса. То же самое должно было бы иметь место и для железного стержня магнитного диполя, что противоречит результатам второго эксперимента. Таким образом, это противоречие вынуждает нас ввести несколько более уточненную

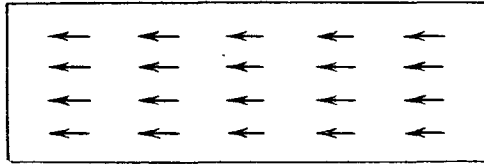


Рис. 30.

теорию. Вместо нашей первоначальной модели мы можем представить себе, что магнит состоит из *очень малых элементарных* магнитных диполей, которые не могут быть разделены на отдельные полюсы. Во всем магните господствует порядок, ибо все элементарные диполи в нем имеют одинаковое направление (рис. 30). Мы непосредственно видим, почему разрезание магнита вызывает появление двух новых полюсов на новых концах и почему эта более тонкая теория объясняет факты как эксперимента 1, так и эксперимента 2.

Многие факты можно объяснить и без этого уточнения теории. Возьмем пример: мы знаем, что магнит притягивает куски железа. Почему? В куске обычного железа обе магнитные жидкости смешаны так, что не обнаруживается никакого чистого эффекта. Поднесение положительного полюса действует, как «приказ к разделению» жидкостей в результате притяжения отрицательной жидкости в железе и отталкивания положительной. Возникает притяжение между железом и магнитом. Если магнит отодвинут, жидкости более или менее возвращаются к своему первоначальному положению, что зависит от сте-

пени их «воспоминания» о приказывающем голосе внешней силы.

Необходимо немного сказать о количественной стороне проблемы. Имея два очень длинных магнитных стержня, мы могли бы исследовать притяжение (или отталкивание) их полюсов, когда они близко поднесены друг к другу. Если стержни достаточно длинны, то действие других концов стержней ничтожно. Как зависит притяжение или отталкивание от расстояния между полюсами? Ответ, данный экспериментом Кулона, таков: зависимость от расстояния та же, что и в законе тяготения Ньютона, и в законе электростатики Кулона.

Мы опять видим в этой теории приложение общей точки зрения: тенденцию описать все явления посредством сил притяжения и отталкивания, зависящих только от расстояния и действующих между неизменными частями.

Здесь следовало бы упомянуть один хорошо известный факт, который мы используем в дальнейшем. Земля — это большой магнитный диполь. Нет ни малейшего намека на объяснение того, почему это так. Северный географический полюс почти совпадает с отрицательным (—) магнитным полюсом, а Южный географический полюс — с положительным (+) магнитным. Названия положительный и отрицательный — это дело лишь соглашения, но, поскольку они так однажды обозначены, это вынуждает нас и в любых других случаях соответственно различать полюсы. Магнитная игла, насаженная на вертикальную ось, подчиняется «приказу» магнитной силы Земли. Она направляет свой (+) полюс к Северному географическому полюсу, то есть по направлению к (—) магнитному полюсу Земли.

Хотя в области электрических и магнитных явлений, указанных здесь, мы можем последовательно провести механистическую точку зрения, нет никакого основания гордиться этим или радоваться этому. Некоторые черты этой теории являются, конечно, неудовлетворительными, если не обескураживающими. Мы должны были изобрести новые виды субстанций: две электрические жидкости и элементарные магнитные диполи. Изобилие субстанций начинает становиться чрезмерным.

Силы просты. Они одинаково выражены для тяготения, электричества и магнетизма. Но цена, уплаченная за эту простоту, высока: введение новых невесомых субстанций. Они являются довольно искусственными понятиями и совершенно не связаны с основной субстанцией — массой.

### ПЕРВАЯ СЕРЬЕЗНАЯ ТРУДНОСТЬ

Мы уже готовы к тому, чтобы отметить первую серьезную трудность в приложении нашей общей философской точки зрения. Позднее будет показано, что эта трудность, совместно с другими, еще более серьезными, привела к полному крушению уверенности в том, что все явления могут быть объяснены механистически.

Особенно быстрое развитие электричества как ветви науки и техники началось с открытия электрического тока. Здесь мы находим в истории науки один из очень немногих примеров, в которых случай сыграл существенную роль. История конвульсий лягушечьей лапки рассказана во многих вариантах. Не ручаясь за достоверность в отношении деталей, можно без сомнения сказать, что случайное открытие Гальвани привело Вольту в конце восемнадцатого столетия к построению прибора, известного под названием *вольтовой батареи*. Теперь она практически не употребляется, но на нее еще указывают как на очень простой пример источника тока в школьных демонстрациях и в учебниках.

Принцип ее построения прост. Берется несколько стеклянных стаканов, из которых каждый содержит воду и немного серной кислоты. В каждом стакане погружены в раствор две металлические пластинки — одна медная, а другая цинковая. Медная пластинка одного стакана соединена с цинковой следующего, так что только цинковая пластинка первого стакана и медная последнего остаются несоединенными. Мы можем обнаружить разность электрических потенциалов медной пластинки первого стакана и цинковой последнего посредством весьма чувствительного электроскопа, если число «элементов», т. е. число стаканов с пластинками, составляющими батарею, достаточно велико.



Мы ввели батарею, составленную из некоторых элементов, только для того, чтобы получить нечто, легко измеряемое уже описанным прибором. Для дальнейших рассуждений с таким же успехом будет служить один элемент. Обнаруживается, что потенциал меди выше, чем потенциал цинка. Слово «выше» употребляется здесь в том же смысле, в каком  $+2$  больше, чем  $-2$ . Если один проводник связан со свободной медной пластинкой, а другой с цинком, оба станут заряженными, первый положительно, а второй отрицательно. В этой стадии рассуждений ничего особенно нового или поразительного не появилось, и мы можем попробовать применить наши предыдущие представления о разности потенциалов. Мы видели, что разность потенциалов между двумя проводниками можно быстро уничтожить посредством соединения проводников проволокой, в которой возникает поток электрической жидкости от одного проводника к другому. Этот процесс был уподоблен выравниванию температур посредством теплового потока. Но производит ли поток в вольтовой батарее работу?

По словам Вольта, пластинки ведут себя как проводники:

«...слабо заряженные, которые действуют непрерывно или так, что их заряд после каждого разряда вновь восстанавливается; которые, одним словом, составляют неограниченный заряд или производят непрерывное действие или импульс электрической жидкости».

Результат этого эксперимента удивителен потому, что разность потенциалов между медной и цинковой пластинками не уменьшается, как в случае двух заряженных проводников, связанных проволокой. Разность эта остается неизменной, и согласно теории жидкостей должен возникать постоянный поток электрической жидкости от высшего потенциального уровня (медная пластинка) к низшему (цинковая пластинка). Пытаясь спасти теорию жидкостей, мы можем предположить, что действует некоторая постоянная сила, которая возрождает разность потенциалов и вызывает поток электрической жидкости. Но явление в целом удивительно, если рассматривать его с энергетической точки зрения. В проволоке, по которой течет ток, порождается заметное количество теплоты,

достаточное даже для того, чтобы расплавить проволоку, если она тонка. Следовательно, в проволоке создается тепловая энергия. Но вся вольтова батарея образует изолированную систему, так как она не получает энергии извне. Если мы хотим спасти закон сохранения энергии, мы должны найти место, где происходят превращения, за счет которых создается теплота. Нетрудно установить, что в батарее происходят сложные химические процессы, в которых активное участие принимают как сама жидкость, так и погруженные в нее медь и цинк. С энергетической точки зрения здесь имеется цепь превращений: химическая энергия → энергия текущей электрической жидкости, т.е. тока, → теплота. Вольтова батарея не сохраняется вечно, химические изменения, связанные с потоком электричества, после некоторого времени делают батарею неработоспособной.

Эксперимент, который по-настоящему обнаружил большие трудности в применении механистических идей, должен для впервые слушающего о нем звучать странно. Он осуществлен Эрстедом около ста двадцати лет назад. Последний пишет:

«Этими экспериментами, кажется, показано, что магнитная игла сдвигалась из своего положения с помощью гальванического прибора, и именно тогда, когда гальваническая цепь была замкнута, а не разомкнута, как напрасно считали несколько лет назад очень известные физики».

Предположим, что мы имеем вольтову батарею и кусок металлической проволоки. Если проволока соединена с медной пластинкой, но не связана с цинковой, то существует разность потенциалов, но ток течь не может. Предположим, что проволока изогнута в форме кольца, в центре которого расположена магнитная игла, причем как проволочное кольцо, так и игла лежат в одной и той же плоскости. Пока проволока не прикасается к цинковой пластинке, ничего не происходит. Никаких действующих сил нет, наличие разности потенциалов не оказывает влияния на положение иглы. Кажется трудным понять, почему «очень известные физики», как выразился Эрстед, ожидали такого влияния.

Соединим теперь проволоку с цинковой пластинкой. Немедленно произойдут странные вещи. Магнитная игла

выходит из своего первоначального положения. Один из ее полюсов направлен к читателю, если страница этой книги представляет плоскость кольца (рис. 31). Эффект показывает, что на магнитный полюс действует сила, *перпендикулярная* к плоскости кольца. Перед лицом экспериментальных фактов мы едва ли можем избежать такого вывода о направлении действующей силы.

Этот эксперимент интересен в первую очередь тем, что он показывает связь между двумя на первый взгляд совершенно различными явлениями — магнетизмом и электрическим током. Имеется и другой, даже более важный момент. Сила взаимодействия между магнитным полюсом и малыми отрезками

провода, по которой течет ток, не может лежать вдоль линий, связывающих проводку и иглу или частицы текущей электрической жидкости и элементарные магнитные диполи. Сила перпендикулярна к этим линиям! Впервые появляется сила, совершенно отличная от тех сил, к которым, соответственно нашей механистической

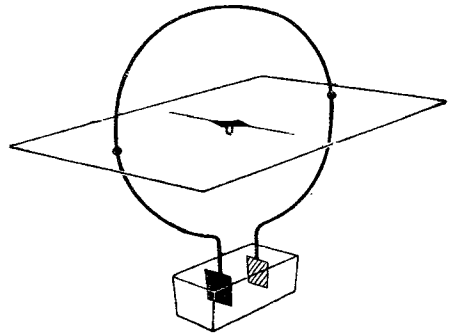


Рис. 31.

точке зрения, мы стремились свести все действия внешнего мира. Мы помним, что силы тяготения, электростатики, магнетизма, подчиняющиеся законам Ньютона и Кулона, действуют вдоль линии, соединяющей оба притягивающихся или отталкивающихся тела.

Эта трудность была еще более подчеркнута экспериментом, который с большим искусством осуществлен Роуландом почти шестьдесят лет назад. Оставляя в стороне технические детали, мы могли бы описать этот эксперимент следующим образом. Вообразим себе маленький заряженный шар (рис. 32). Представим себе далее, что этот шар очень быстро движется по окружности, в центре которой находится магнитная игла. Принципиально этот эксперимент таков же, что и эксперимент Эрстеда, единственное отличие состоит в том, что вместо обычного тока

мы имеем механически совершающееся движение электрического заряда. Роуланд нашел, что результат в самом деле подобен тому, который наблюдался, когда по витку проволоки протекал ток. Магнит отклоняется перпендикулярной силой.

Пусть теперь заряд движется быстрее. В результате сила, действующая на магнитный полюс, возрастает; отклонение магнита от его начального положения становится более заметным. Это наблюдение представляет новое большое усложнение. Сила не только не совпадает с линией, связывающей заряд и магнит, но и интенсивность ее зависит от скорости заряда. Вся механистическая точка зрения базировалась на уверенности в том, что все явления

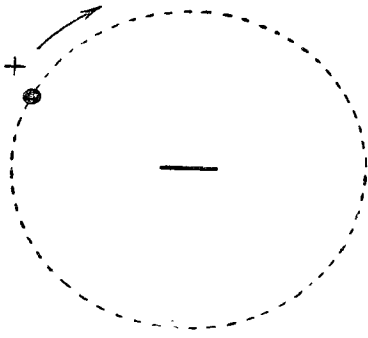


Рис. 32.

могут быть объяснены в пределах сил, зависящих только от расстояния, а не от скорости. Результат эксперимента Роуланда, конечно, подрывает эту уверенность. Все же мы можем попробовать остаться консервативными и искать решения в рамках старых идей.

Трудности этого рода, внезапные и неожиданные препятствия в триумфальном развитии теории, часто вырастают в науке. Иногда простое обобщение старых идей оказы-

вается, по крайней мере временно, хорошим выходом. Например, в настоящем случае казалось бы достаточным расширить предыдущую точку зрения и ввести более общее понятие сил, действующих между элементарными частицами. Однако очень часто оказывается невозможным подправить старую теорию, и трудности приводят к ее упадку и к развитию новой. В данном случае сыграло роль не только поведение ничтожной магнитной иглы, которая разрушила на первый взгляд хорошо обоснованные и преуспевающие механистические теории. Другой удар, еще более энергичный, был нанесен с совершенно другой стороны. Но это другая история, и мы расскажем ее позднее.

## СКОРОСТЬ СВЕТА

В галилеевых *Беседах о двух новых науках* мы находим разговор учителя и его учеников о скорости света:

**С а г р е д о:** Но какого рода и насколько большой должны мы считать эту скорость света? Является ли движение света мгновенным или же, подобно движению других тел, оно требует времени? Можем ли мы решить это с помощью эксперимента?

**С и м п л и ч и о:** Повседневный опыт показывает, что распространение света мгновенно, ибо, когда мы наблюдаем на большом расстоянии действие артиллерии, то пламя достигает наших глаз без потери времени, а звук достигает уха лишь через заметный промежуток времени.

**С а г р е д о:** Ну, Симпличио, я в состоянии вывести из этого общеизвестного опыта лишь то, что звук, достигая наших ушей, путешествует медленнее, чем свет; это не говорит еще о том, распространяется ли свет мгновенно или же, хотя он и движется чрезвычайно быстро, все же требует времени...

**С а л в и а т и:** Малая доказательность этих и других подобных наблюдений однажды заставила меня изобрести метод, с помощью которого можно было бы точно удостовериться в том, является ли освещение, т. е. распространение света, действительно мгновенным...

Далее Сальвиати продолжает объяснять метод своего эксперимента. Для того чтобы понять его идею, представим себе, что скорость света не только конечна, но и мала, что движение света замедлилось подобно тому, как может замедлиться на экране реальное движение при просмотре замедленно движущейся пленки. Два человека, *A* и *B*, держат закрытые фонари и стоят, скажем, на расстоянии одного километра друг от друга. Первый человек, *A*, открывает свой фонарь. Оба они согласились, что *B* откроет свой фонарь в момент, когда он увидит свет *A*. Предположим, что в нашем «замедленном движении» свет проходит один километр в секунду. *A* посылает сигнал, открывая свой фонарь, *B* видит это спустя секунду и посылает ответный сигнал. Этот сигнал получается *A* спустя две секунды после того, как он послал свой сигнал. То есть, если свет движется со скоростью одного километра в секунду, то протечет две секунды между посылкой и приемом сигналов *A*, если предположить, что *B* находится на расстоянии одного километра. Наоборот, если *A* не знает скорости света, но предполагает, что его компаньон действует так, как условились, и он заметил, что *B* открыл

фонарь две секунды спустя после того, как он открыл свой, то он может заключить, что скорость света равна одному километру в секунду.

При той экспериментальной технике, какая была доступна во времена Галилея, он имел мало шансов определить скорость света таким путем. Если расстояние было порядка одного километра, то он должен был бы определять промежутки времени порядка одной стотысячной секунды.

Галилей сформулировал проблему определения скорости света, но он не разрешил ее. Формулировка проблемы часто более существенна, чем ее разрешение, которое может быть делом лишь математического или экспериментального искусства. Постановка новых вопросов, развитие новых возможностей, рассмотрение старых проблем под новым углом зрения требуют творческого воображения и отражают действительный успех в науке. Принцип инерции, закон сохранения энергии были получены только благодаря новым и оригинальным идеям в отношении уже хорошо известных экспериментов и явлений. Много примеров такого рода можно найти на последующих страницах этой книги, где будет подчеркнута важность рассмотрения известных фактов в новом свете и будут описаны новые теории.

Возвращаясь к сравнительно простому вопросу об определении скорости света, мы можем заметить, что удивительно, почему Галилей не установил, что его эксперимент мог бы быть осуществлен значительно проще и точнее одним человеком. Вместо того, чтобы ставить на некотором расстоянии от себя своего компаньона, он мог бы установить там зеркало, которое автоматически отбрасывало бы сигнал сразу же после его получения.

Около двухсот пятидесяти лет спустя зеркало использовал Физо, который был первым, кто определил скорость света с помощью экспериментов со светом, исходящим от земного источника. С помощью астрономических наблюдений скорость света была определена Рёмером гораздо раньше, хотя и с меньшей точностью.

Совершенно ясно, что благодаря своей огромной величине скорость света могла быть измерена только при условии, если расстояния были сравнимы с расстояниями

между Землей и другими планетами солнечной системы, или же с помощью весьма утонченной экспериментальной техники. Первый метод — это метод Рёмера, второй же — метод Физо. Со времени этих первых экспериментов скорость света, представляющая весьма важную величину, измерялась много раз со все возрастающей точностью. В нашем столетии для этой цели была изобретена Майкельсоном весьма утонченная аппаратура. Результат этих экспериментов можно выразить просто: скорость света *в вакууме* примерно равна 300 000 километров в секунду.

### СВЕТ КАК СУБСТАНЦИЯ

Мы опять начинаем с нескольких экспериментальных фактов. Только что приведенная величина относится к скорости света *в вакууме*. Свет распространяется с этой скоростью в пустом пространстве. Мы можем видеть и через пустой стеклянный сосуд, когда из него удален воздух. Мы видим планеты, звезды, небесные тела, хотя свет доходит от них к нашим глазам через пустое пространство. Тот простой факт, что мы можем видеть через стеклянный сосуд, независимо от того, имеется ли внутри него воздух или нет, показывает нам, что наличие воздуха имеет весьма малое значение. На этом основании мы можем осуществлять оптические эксперименты в обыкновенной комнате с тем же самым эффектом, как если бы там не было воздуха.

Один из наиболее простых оптических фактов — это прямолинейное распространение света. Опишем примитивные эксперименты, показывающие это. Перед точечным источником помещен экран с отверстием. Точечный источник — это очень малый источник света, скажем, маленькое отверстие в закрытом фонаре. На отдаленной стене отверстие в экране будет представлено в виде светлого пятна на темном фоне. Рисунок 33 показывает, как это явление связано с прямолинейным распространением света. Все подобные явления, даже в более сложных случаях, в которых кроме света и тени появляются еще и полутени, можно объяснить, если предположить, что и в вакууме, и в воздухе свет распространяется по прямым линиям.

Возьмем другой случай, когда свет проходит через вещество. Пусть световой пучок проходит через вакуум и падает на стеклянную пластинку. Что происходит? Если бы закон прямолинейного движения был по-прежнему справедлив, то путь светового пучка шел бы вдоль линии, указанной на рисунке 34 пунктиром. Но в действительности это не так. Луч преломляется, как указано на рисунке. Явление, которое мы здесь наблюдаем, называется *рефракцией* (*преломлением*). Одной из многих демонстраций рефракции является известный опыт с палкой, которая, будучи наполовину опущенной в воду, кажется переломленной.

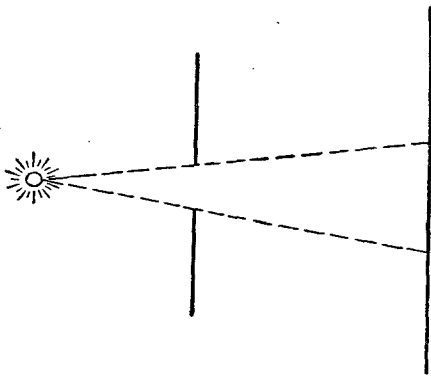


Рис. 33.

Этих фактов достаточно для того, чтобы построить элементарную механистическую теорию света. Наша цель здесь — показать, как идеи субстанции, частиц и сил проникли в область оптики и как в конечном счете потеряла крах старая философская точка зрения.

Здесь теория приходит на ум в самой простой и примитивной форме. Предположим, что все светящиеся тела испускают частицы света, или *корпускулы*, которые, попадая в наши глаза, производят в них ощущение света. Мы уже настолько привыкли вводить новые субстанции, если это необходимо для механистического объяснения, что можем сделать это еще раз без больших колебаний. Эти корпускулы должны проходить по прямым линиям через пустое пространство с известной скоростью, приходя к нашим глазам сообщения от тел, испускающих свет.

Здесь теория приходит на ум в самой простой и примитивной форме. Предположим, что все светящиеся тела испускают частицы света, или *корпускулы*, которые, попадая в наши глаза, производят в них ощущение света. Мы уже настолько привыкли вводить новые субстанции, если это необходимо для механистического объяснения, что можем сделать это еще раз без больших колебаний. Эти корпускулы должны проходить по прямым линиям через пустое пространство с известной скоростью, приходя к нашим глазам сообщения от тел, испускающих свет.

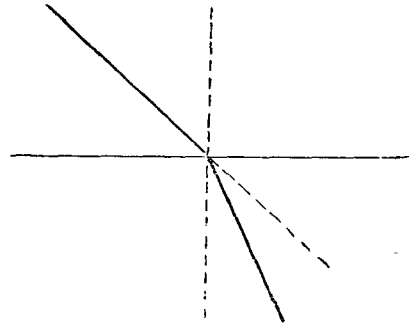


Рис. 34.

Здесь теория приходит на ум в самой простой и примитивной форме. Предположим, что все светящиеся тела испускают частицы света, или *корпускулы*, которые, попадая в наши глаза, производят в них ощущение света. Мы уже настолько привыкли вводить новые субстанции, если это необходимо для механистического объяснения, что можем сделать это еще раз без больших колебаний. Эти корпускулы должны проходить по прямым линиям через пустое пространство с известной скоростью, приходя к нашим глазам сообщения от тел, испускающих свет.



Все явления, показывающие прямолинейное распространение света, подкрепляют корпускулярную теорию света, ибо именно этот вид движения предписан корпускулам. Теория объясняет очень просто и отражение света зеркалом; это отражение такого же рода, как и отражение, обнаруживаемое в механических экспериментах с упругими мячами, ударяющимися в стену, как показывает рисунок 35.

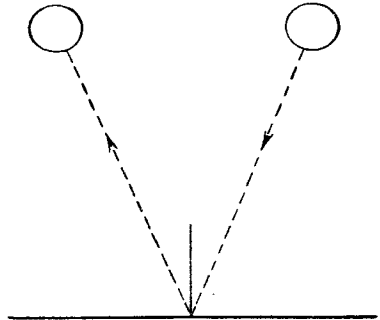


Рис. 35.

Объяснение рефракции немного труднее. Не входя в детали, мы все же видим возможность ее механистического объяснения. Если корпускулы падают, например, на поверхность стекла, то возможно, что на них действует сила, создаваемая частицами вещества, которая довольно странно действует только в непосредственном содействии с веществом. Как мы знаем, любая сила, действующая на движущуюся частицу, изменяет ее скорость. Если сила, действующая на световую корпускулу, есть притяжение, перпендикулярное к поверхности стекла, то новое движение луча будет где-то между линией первоначального пути и перпендикуляром к поверхности стекла. Кажется, что это элементарное объяснение обещает успех корпускулярной теории света. Однако, чтобы определить полезность и степень справедливости этой теории, мы должны исследовать новые и более сложные факты.

## ЗАГАДКА ЦВЕТА

Все богатство цветов в природе впервые объяснил все тот же гениальный Ньютон. Здесь мы даем описание одного из экспериментов Ньютона в его собственных словах:

«В начале 1666 года (в это время я занимался шлифовкой стеклами разных форм, чем сферические) я достал треугольную стеклянную призму, чтобы с нею произвести опыты над знаменитым явлением цветов. Для этой цели, затемнив свою комнату и проделав небольшое

отверстие в оконных ставнях для пропускания в нужном количестве солнечного света, я поместил призму там, где входил свет, так что он мог преломляться к противоположной стене. Зрелище живых и ярких красок, получавшихся при этом, доставляло мне приятное удовольствие».

Солнечный свет — «белый». После прохождения через призму в нем обнаруживаются все цвета, которые существуют в видимом мире. Сама природа воспроизводит тот же самый результат в прекрасной цветной дуге — радуге. Попытки объяснить это явление очень стары. Библейская легенда о том, что радуга — это божественный знак примирения с человеком, — это, в некотором смысле, тоже «теория». Но она не дает удовлетворительного объяснения, почему радуга время от времени повторяется и почему ее появление всегда связано с дождем. Вся загадка цвета впервые подверглась научному обсуждению, и разрешение ее было намечено в великой работе Ньютона.

Один край радуги всегда красный, а другой — фиолетовый. Между ними расположены все другие цвета. Приведем ньютоновское объяснение этого явления. Каждый цвет уже присутствует в белом свете. Все цвета передаются через межпланетное пространство и атмосферу совместно и дают эффект в виде белого света. Белый свет — это, так сказать, смесь разнородных корпускул, принадлежащих к разным цветам. В эксперименте Ньютона призма разделяет их в пространстве. Согласно механистической теории, рефракция (преломление) обязана силам, которые происходят от частиц стекла и действуют на частицы света. Эти силы различны для корпускул, принадлежащих к различным цветам, они наибольшие для фиолетового и наименьшие для красного. Путь корпускул каждого отдельного цвета будет преломляться по-своему и будет отделяться от других, когда свет покидает призму. В радуге роль призм играют капли воды.

Субстанциональная теория света теперь более усложнена, чем прежде. Мы имеем уже не одну световую субстанцию, а множество, и каждая из них относится к отдельному цвету. Однако, если в теории имеется доля правды, ее следствия должны согласоваться с наблюдением.

Серии цветов в белом солнечном свете, обнаруженные экспериментом Ньютона, называются солнечным *спектром*

или, точнее, его *видимым спектром*. Описанное здесь разложение белого света на составляющие его компоненты называется *дисперсией* света. Разделенные цвета спектра можно было бы смешать снова вместе с помощью второй, должным образом приспособленной, призмы, если только данное объяснение не является ложным. Процесс был бы как раз обратным предыдущему. Мы получили бы белый свет из цветов, разделенных ранее. Ньютон экспериментально подтвердил, что в самом деле возможно этим путем получить белый свет из его спектра, а спектр из белого света столько раз, сколько захочется. Эти эксперименты создали строгую основу для теории, в которой корпускулы, принадлежащие каждому цвету, ведут себя как неизменяемые субстанции. По этому поводу Ньютон писал:

«... эти цвета не порождены вновь, а лишь стали видными благодаря разделению, ибо, если их снова полностью смешать вместе, то они вновь составят тот свет, который они составляли до разделения. По той же причине изменения, которые получаются при соединении различных цветов, не реальны, ибо, если различные лучи вновь разъединить, они будут проявлять точно те же цвета, как и до вхождения в смесь. Как вы знаете, синие и желтые порошки при тонком смешивании кажутся невооруженному глазу зелеными, и все же цвета составляющих корпускул не изменились в действительности, а лишь смешались. Ибо, если посмотреть в хороший микроскоп, они по-прежнему будут казаться только синими и желтыми».

Предположим, что мы выделили очень узкую полосу спектра. Это означает, что из всего множества цветов мы позволили лишь одному пройти сквозь щель, другие же задержали экраном. Луч, который проходит сквозь щель, будет состоять из *однородного* света, т. е. света, который не может быть разделен на дальнейшие компоненты. Это следствие теории и его легко можно проверить экспериментально. Такой луч однородного цвета никаким путем нельзя разделить дальше. Имеется простой способ получения источников однородного света. Например, натрий, будучи раскален, испускает однородный желтый свет. Производить обычные оптические эксперименты с однородным светом часто очень удобно, ибо легко понять, что в этом случае результат будет гораздо проще.

Представим себе, что внезапно произошло очень странное событие: наше Солнце стало испускать только

однородный свет некоторого определенного цвета, скажем, желтого. Тогда огромное многообразие цветов на земле немедленно исчезло бы. Все выглядело бы либо желтым, либо черным! Это предсказание есть следствие субстанциональной теории света, ибо новые цвета не могут быть созданы. Справедливость его можно проверить экспериментально: в комнате, где единственным источником света является раскаленный натрий, все кажется либо желтым, либо черным. Богатство красок в мире отражает многообразие цветов, из которых состоит белый свет.

Субстанциональная теория света во всех этих случаях действует блестяще, хотя необходимость введения стольких субстанций, сколько имеется цветов, может нас несколько беспокоить. Предположение, что все корпускулы света имеют одну и ту же скорость в пустом пространстве, также кажется очень искусственным.

Вполне можно представить себе, что другой ряд положений, теория совершенно другого характера, действовала бы столь же хорошо и давала бы все необходимые объяснения. В самом деле, скоро мы станем свидетелями развития другой теории, основанной на совершенно иных понятиях и все же объясняющей ту же самую область оптических явлений. Однако, прежде чем сформулировать положения, лежащие в основе этой новой теории, мы должны осветить вопрос, никак не связанный с этими оптическими явлениями. Мы должны вернуться к механике и спросить:

### ЧТО ТАКОЕ ВОЛНА?

Какая-нибудь сплетня, начавшаяся в Вашингтоне, очень быстро доходит до Нью-Йорка, несмотря на то что ни одно лицо, принимавшее участие в ее распространении, не передвигалось между этими двумя городами. Имеются два совершенно различных способа передачи или движения слухов из Вашингтона в Нью-Йорк и движения лиц, передающих слух.

Порыв ветра, проносясь над хлебным полем, создает волну, которая распространяется по всему полю. И здесь опять мы должны различать между движением волны и движением отдельных растений, которые совершают лишь

малые колебания. Все мы видели волны, которые распространяются все более и более широкими кругами, когда в воду брошен камень. Движение волны сильно отличается от движения частиц воды. Частицы движутся лишь вверх и вниз. Наблюдаемое движение волны — это перемещение состояния вещества, а не самого вещества. Пробка, плавающая на волне, ясно показывает это, ибо она движется вверх и вниз, подражая действительному движению воды, а не переносится вдоль волны.

Чтобы лучше понять механизм волны, рассмотрим опять идеализированный эксперимент. Предположим, что огромное пространство сплошь заполнено водой или воздухом, или какой-либо другой «средой». Где-то в центре имеется шар (рис. 36). В начале эксперимента никакого движения нет вовсе. Вдруг шар начинает ритмически «дышать», расширяясь и сжимаясь в объеме, однако все время оста-

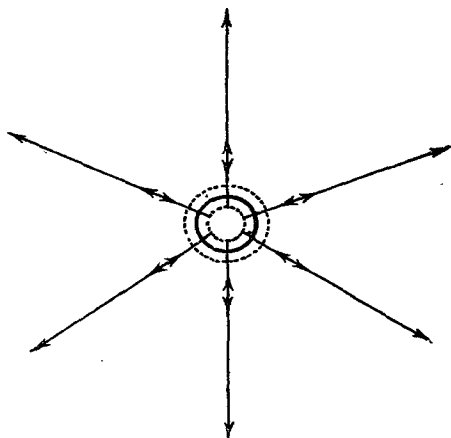


Рис. 36.

ваясь сферическим по форме. Что происходит в среде? Начнем рассмотрение в тот момент, когда шар начинает расширяться. Частицы среды, находящиеся в непосредственной близости к шару, отталкиваются, так что плотность прилегающего к шару слоя воды или воздуха увеличивается против своего нормального значения. Точно так же, когда шар сжимается, то плотность той части среды, которая непосредственно окружает шар, будет уменьшаться. Эти изменения плотности распространяются во всей среде. Частицы, составляющие среду, проделывают лишь малые колебания, но движение в целом — это движение поступательной волны. Существенно новым здесь является то, что впервые мы рассматриваем движение чего-то, что есть не вещество, а энергия, распространяющаяся в веществе.

Применяя пример пульсирующего шара, мы можем ввести два общих физических понятия, важных для характеристики волн. Первое — это скорость, с которой распространяется волна. Она будет зависеть от среды и, например, различна для воды и воздуха. Второе понятие — *длина волны*. В волнах на поверхности моря или реки длина волны — это расстояние от углубления одной волны до углубления следующей или же расстояние от гребня одной волны до гребня следующей. Морские волны имеют большую длину волны, чем волны на реке. В наших волнах, образующихся благодаря пульсации шара, длина волны — это расстояние, взятое в некоторый определенный момент между двумя соседними шаровыми слоями, у которых одновременно плотность имеет максимальное или минимальное значение. Очевидно, что это расстояние зависит не только от среды. Большое влияние будет, конечно, иметь быстрота пульсации шара; так, длина волны будет короче, если пульсация становится быстрее, и длиннее, если пульсация медленнее.

Это понятие волны оказывается очень удачным в физике. Оно является определенно механическим понятием. Явление сводится к движению частиц, которые, согласно кинетической теории, образуют вещество. Таким образом, всякая теория, которая употребляет понятие волны, может, вообще говоря, считаться механической теорией. В частности, объяснение акустических явлений существенно опирается на это понятие. Колеблющиеся тела, например такие, как голосовые связки или скрипичные струны, являются источниками звуковых волн, которые распространяются в воздухе, аналогично тому, как это имеет место для волн, образующихся от пульсирующего шара. Вот так, с помощью понятия волны, можно все акустические явления свести к механическим.

Уже было подчеркнуто, что мы должны отличать друг от друга движение частиц и движение самой волны, которая является состоянием среды. Оба движения совершенно различны, но очевидно, что в нашем примере пульсирующего шара оба движения происходят вдоль одной и той же прямой. Частицы среды колеблются в небольших пределах, и плотность увеличивается и уменьшается периодически в соответствии с этим движением. Направле-

ние, в котором распространяются волны, и направление, вдоль которого совершаются колебания, одно и то же. Волны этого типа называются *продольными*. Но является ли этот тип волн единственным? Для наших дальнейших рассуждений важно ясно представить себе возможность другого типа волны, которая называется *поперечной*.

Изменим наш предыдущий пример. Пусть мы по-прежнему имеем шар, но он погружен в среду другого рода:

вместо воздуха или воды взято нечто вроде студня или желе. Больше того, шар больше не пульсирует, а поворачивается на небольшой угол сначала в одном направлении, а затем в обратном, всегда с одним и тем же ритмом и вокруг определенной оси (рис. 37). Желе прилипает к шару, и прилипающие частицы вынуждены повторять его движение. Эти частицы вынуждают частицы,

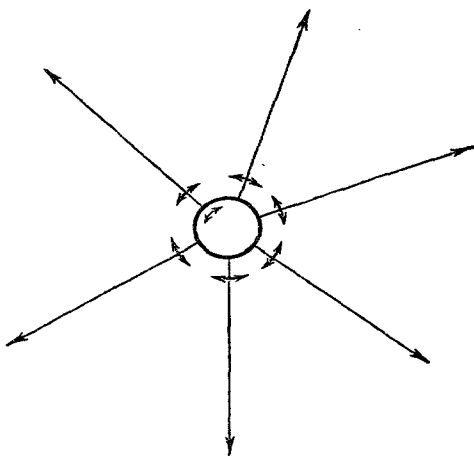


Рис. 37.

расположенные немного дальше, повторять то же движение и т. д., так что в среде возникает волна. Если мы помним о различии между движением среды и движением волны, то мы видим, что в данном случае они явно не совпадают. Волна распространяется в направлении радиуса шара, а частицы среды движутся перпендикулярно к этому направлению. Следовательно, мы создали поперечную волну.

Волны, распространяющиеся на поверхности воды, поперечны. Плавающая пробка движется вверх и вниз, а волна распространяется вдоль горизонтальной плоскости. С другой стороны, звуковые волны дают нам наиболее известный пример продольных волн.

Еще одно замечание: волна, созданная пульсирующим или колеблющимся в однородной среде шаром, — это *сферическая волна*. Она называется так потому, что в

любой данный момент все точки среды, размещающиеся на любой сфере, окружающей источник, ведут себя одинаковым образом. Рассмотрим часть такой сферы на большом расстоянии от источника (рис. 38). Чем дальше от источника мы берем такую часть сферы и чем меньшую часть мы берем, тем больше она похожа на часть плоскости. Не стремясь быть слишком строгими, мы можем сказать, что нет существенного различия между частью плоскости и частью сферы, радиус которой достаточно велик. Очень

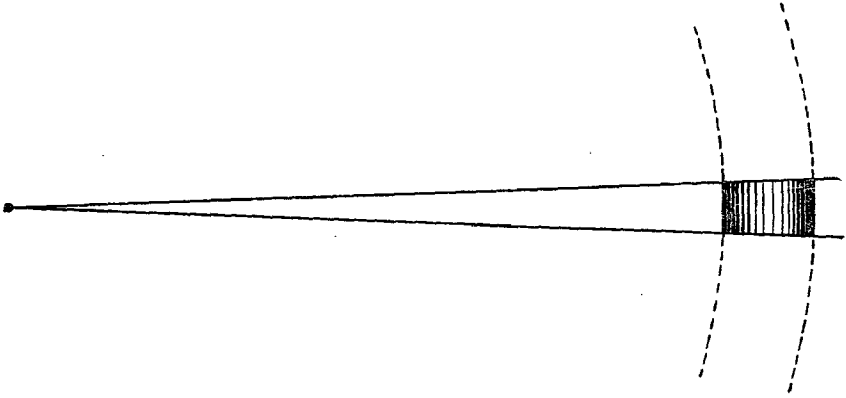


Рис. 38.

часто мы говорим о небольших частях сферической волны, далеко продвинувшейся от ее источника, как о *плоских волнах*. Чем дальше мы помещаем заштрихованную на рисунке часть поверхности от центра сферы и чем меньше угол между двумя радиусами, тем более она приближается к представлению о плоской волне. Понятие плоской волны, подобно многим другим физическим понятиям, есть не больше, как абстракция, которую мы можем осуществить лишь с известной степенью точности. Тем не менее это — полезное понятие, и оно нам понадобится в дальнейшем.

## ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Вспомним, почему мы прекратили описание оптических явлений. Нашей целью было ввести другую теорию света, отличную от корпускулярной, но также пытающуюся



ся объяснить ту же область фактов. Чтобы сделать это, мы должны были прервать наш рассказ и ввести понятие волн. Теперь мы можем вернуться к нашему предмету.

Первым, кто выдвинул совершенно новую теорию света, был современник Ньютона — Гюйгенс. В своем трактате о свете он писал:

«Если, кроме того, свет употребляет для своего прохождения некоторое время,— что мы сейчас проверим,— то из этого следует, что это движение, сообщенное окружающей материи, следует одно за другим во времени; поэтому оно, подобно звуку, распространяется сферическими поверхностями и волнами; я называю их волнами по тому сходству, которые они имеют с волнами, образующимися на воде, когда в нее брошен камень, и представляющими собой последовательно расширяющиеся круги, хотя они и возникают от другой причины и находятся лишь на плоской поверхности».

По Гюйгенсу, свет — это волна, передача энергии, а не субстанции. Мы видели, что корпускулярная теория объясняет многие наблюдаемые факты. В состоянии ли это сделать и волновая теория? Мы должны снова поставить те вопросы, на которые уже дали ответ с помощью корпускулярной теории, чтобы увидеть, может ли волновая теория ответить на них с таким же успехом. Сделаем это здесь в форме диалога между Н и Г, где Н — собеседник, убежденный в справедливости корпускулярной теории Ньютона, а Г — убежденный в справедливости теории Гюйгенса. Ни тому, ни другому не разрешено применять доводов, полученных после того, как работа обоих великих мастеров была закончена.

Н. В корпускулярной теории скорость света имеет вполне определенный смысл. Это — скорость, с которой корпускулы движутся в пустом пространстве. Что она означает в волновой теории?

Г. Конечно, она означает скорость световой волны. Всякому известно, что волна распространяется с некоторой определенной скоростью, и то же должно быть с волнами света.

Н. Это не так просто, как кажется. Звуковые волны распространяются в воздухе, морские волны в воде. Каждая волна должна иметь материальную среду, в которой она распространяется. Но свет проходит через вакуум, в то время как звук не проходит. Предположить волну в пустом

пространстве фактически означает вовсе не предполагать никакой волны.

Г. Да, это трудность, хотя и не новая для меня. Мой учитель изучал ее очень внимательно и решил, что единственный выход — предположить существование гипотетической субстанции, *эфира*, — передающей среды, заполняющей всю вселенную. Вселенная, так сказать, погружена в эфир. Если у нас есть смелость ввести это понятие, то все становится ясным.

Н. Но я возражаю против такого предположения. Во-первых, оно вводит новую гипотетическую субстанцию, а мы уже имеем слишком много субстанций в физике. Имеется также и другое основание против него. Вы не сомневаетесь в том, что мы должны все объяснять в пределах механики. А как относительно эфира? В состоянии ли вы ответить на простой вопрос о том, как эфир построен из своих элементарных частиц и как он обнаруживается в других явлениях?

Г. Ваше первое возражение, конечно, справедливо. Но, вводя некий искусственный невесомый эфир, мы сразу отделяемся от гораздо более искусственных световых корпускул. Мы имеем только одну «таинственную» субстанцию вместо бесконечного числа их, соответствующего огромному числу цветов в спектре. Не кажется ли вам, что это и есть настоящий прогресс? По крайней мере все трудности сконцентрированы в одном пункте. Мы не нуждаемся больше в искусственном предположении, что частицы, относящиеся к различным цветам, движутся с одной и той же скоростью в пустом пространстве. Ваше второе возражение тоже справедливо. Мы не можем дать механического объяснения эфира. Но нет никакого сомнения в том, что дальнейшее изучение оптических и, может быть, других явлений обнаружит его структуру. В настоящее время мы должны ожидать новых экспериментов и заключений, но я надеюсь, что, в конце концов, мы будем в состоянии разрешить проблему о механической структуре эфира.

Н. Оставим на время этот вопрос, так как он не может быть разрешен теперь. Мне хотелось бы видеть, как ваша теория, даже если мы отбросим трудности, объясняет те явления, которые так ясны и понятны в корпускулярной

теории. Возьмем, например, тот факт, что световые лучи проходят в *вакууме* или в воздухе вдоль прямых. Кусок бумаги, помещенный перед свечой, создает четкую и резко очерченную тень на стене. Резкие тени были бы невозможны, если бы волновая теория была правильна, ибо волны огибали бы края бумаги и тем самым размазывали бы тень. Маленькое судно не является препятствием для морских волн, как вы знаете; они просто огибают его, не отбрасывая тени.

Г. Это не убедительный довод. Возьмите короткие волны на реке, ударяющие о борт большого корабля. Волны, возникающие на одной стороне корабля, не будут видны на другой. Если волны достаточно малы, а корабль достаточно велик, появляется очень четкая тень. Очень возможно, что свет кажется нам проходящим по прямым линиям лишь потому, что его длина волны очень мала в сравнении с величиной обычных препятствий и отверстий, употребляемых в экспериментах. Возможно, что, если бы мы могли создать достаточно малые препятствия, то никакой тени не было бы. Мы можем встретиться с большими экспериментальными трудностями в конструкции приборов, которые могли бы показать, в состоянии ли свет огибать препятствия. Тем не менее, если бы такой эксперимент можно было осуществить, он был бы решающим в борьбе между волновой и корпускулярной теориями света.

Н. Волновая теория может привести к новым фактам в будущем, но я не знаю каких-либо данных, убедительно ее подтверждающих. Пока с полной определенностью не доказано экспериментально, что свет может огибать препятствия, я не вижу какого-либо основания отказываться от корпускулярной теории, которая кажется мне проще и потому лучше, чем волновая.

На этом мы можем прервать диалог, хотя предмет его никоим образом не исчерпан.

Остается еще показать, как волновая теория объясняет преломление света и многообразие цветов. Как мы знаем, корпускулярная теория в состоянии дать такое объяснение. Мы начнем с преломления, но сначала будет полезно рассмотреть пример, не имеющий ничего общего с оптикой.

Пусть по большому открытому пространству прогуливаются два человека, держащие между собой твердый

прут. Вначале они идут прямо вперед, оба с одинаковой скоростью. Пока их скорости одинаковы, велики они или малы — безразлично, прут будет совершать параллельное перемещение, то есть он не будет поворачиваться или изменять свое направление. Все последовательные положения прута параллельны друг другу. Но представим себе теперь, что в течение очень короткого времени, может быть, равного долям секунды, движения обоих людей

стали неодинаковыми. Что произойдет? Ясно, что в течение этого времени прут будет поворачиваться, так что он не будет больше перемещаться параллельно своему первоначальному положению. Когда опять возобновится движение с равными скоростями, оно будет иметь направление, отличное от первоначального. Это ясно показано на рисунке 39. Изменение направления происходит в течение того промежутка времени, в котором скорость обоих пешеходов была различной.

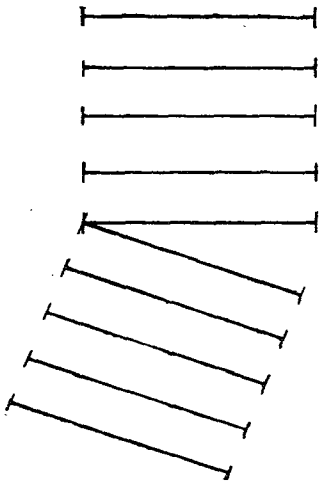


Рис. 39.

Этот пример позволит нам понять преломление волны. Плоскость волны, движущейся в эфире, ударяется о поверхность стекла. На следующем рисунке 40 мы видим волну с сравнительно широким фронтом, который перемещается вперед. Фронт волны — это плоскость, в которой в любой момент времени все части эфира находятся в одинаковом состоянии. Так как скорость зависит от среды, через которую в данный момент времени проходит свет, то скорость в стекле будет отличаться от скорости в пустом пространстве. В течение очень короткого времени, за которое фронт волны входит в стекло, различные части фронта волны будут иметь различные скорости. Ясно, что те части, которые уже достигли стекла, будут двигаться со скоростью света в стекле, в то время как другие части по-прежнему движутся со скоростью света в эфире. Благодаря этой разности в скоростях вдоль фронта волны, существующей в течение времени «погру-

жения» в стекло, направление самой волны будет изменяться.

Итак, мы видим, что не только корпускулярная, но и волновая теория приводит к объяснению преломления. Дальнейшее рассмотрение и некоторое применение математики показывают, что объяснение волновой теории проще и лучше и что следствия из нее находятся в полном

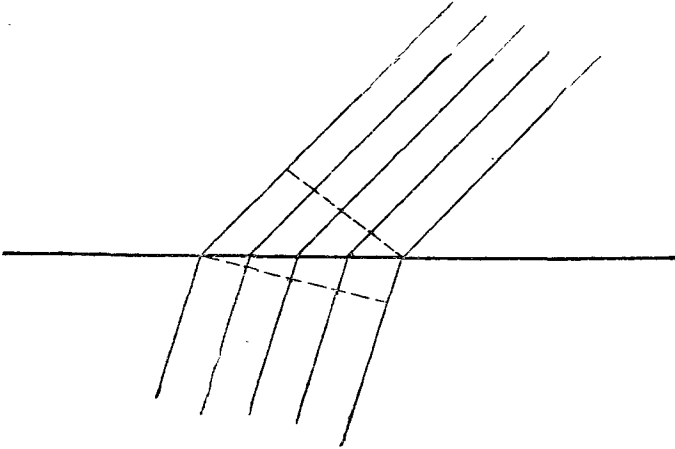


Рис. 40.

согласии с наблюдением. В самом деле, количественные методы рассмотрения позволяют нам вывести скорость света в преломляющей среде, если мы знаем, как преломляется луч, когда он входит в нее. Прямые измерения блестяще подтверждают эти предсказания, а тем самым и волновую теорию света.

Остается еще вопрос о цвете.

Необходимо вспомнить, что волна характеризуется двумя числами — ее скоростью и длиной. Весьма существенным является следующее утверждение волновой теории света: *волны различной длины соответствуют различным цветам*. Длина волны однородного желтого света отлична от длины волны синего или фиолетового. Вместо искусственного разделения корпускул, относящихся к разным цветам, мы имеем естественное различие по длине волны.

Отсюда следует, что эксперименты Ньютона по дисперсии света могут быть описаны двумя различными языками — языком корпускулярной теории и языком волновой теории. Например:

### Корпускулярный язык

Корпускулы, относящиеся к различным цветам, имеют одинаковую скорость в *вакууме*, но различные скорости в стекле.

Белый свет — это совокупность корпускул, относящихся к различным цветам, в то время как в спектрах они разделены.

### Волновой язык

Лучи различных длин волн, относящиеся к различным цветам, имеют одинаковую скорость в эфире, но различные скорости в стекле.

Белый свет — это совокупность волн всех длин, в то время как в спектре они разделены.

Кажется, было бы мудрым избежать двусмысленности, происходящей из факта существования двух различных теорий одних и тех же явлений, решив в пользу одной из них после внимательного рассмотрения достоинств и недостатков каждой. Диалог между Н и Г показывает, что это нелегкая задача. Решение с этой точки зрения было бы скорее делом вкуса, чем научного убеждения. Во времена Ньютона и в течение свыше ста лет спустя большинство физиков предпочитало корпускулярную теорию.

История вынесла свой приговор — в пользу волновой теории и против корпускулярной — гораздо позднее, в середине девятнадцатого столетия. Н в своем разговоре с Г заявлял, что в принципе возможно было экспериментальное решение спора между обеими теориями. Корпускулярная теория не разрешает свету огибать препятствия и требует наличия четких теней. С другой стороны, согласно волновой теории достаточно малые препятствия не будут отбрасывать никакой тени. В работах Юнга и Френеля этот результат был получен экспериментально, там же были сделаны теоретические выводы.

Мы уже обсуждали чрезвычайно простой эксперимент, в котором экран с отверстием помещался перед точечным источником света, а тень отбрасывалась на стену. В даль-

нейшем мы упростим эксперимент, полагая, что источник испускает однородный свет. Для получения наилучших результатов источник света должен быть сильным. Представим себе, что отверстие в экране делается все меньше и меньше. Если в нашем распоряжении есть сильный источник и нам удастся сделать отверстие достаточно малым, то обнаруживаются новые и удивительные явления, совершенно непонятные с точки зрения корпускулярной теории. Нет больше резкого различия между светом и темнотой. Свет постепенно блекнет, переходя в темный фон через серию светлых и темных колец. Появление колец очень характерно для волновой теории. Объяснение чередования светлых и темных полос будет ясно в случае несколько иной экспериментальной установки. Предположим, что мы имеем лист черной бумаги с двумя булавочными дырочками, через которые может проходить свет. Если дырочки близко примыкают друг к другу и очень малы и если однородный свет достаточно силен, то на стене появится множество светлых и темных полос, постепенно ослабевающих и переходящих в темный фон. Объяснение очень простое. Темная полоса появляется там, где впадина волны от одной дырочки встречается с гребнем волны от другой, так что обе погашаются. Полоса света — там, где встречаются две впадины или два гребня от волн, идущих от обеих дырочек, и усиливают друг друга. Сложнее объяснение темных и светлых колец в предыдущем примере, в котором мы применяли экран с одним отверстием, но принципиально оно то же самое. Это появление темных и светлых полос при прохождении света через два отверстия и темных и светлых колец при прохождении одного отверстия следует иметь в виду, ибо позднее мы вернемся к обсуждению обеих различных картин.

Описанные здесь эксперименты обнаруживают *дифракцию* света — отклонение света от прямолинейного распространения, когда на пути световых волн расположены малые отверстия или препятствия (см. фото на вклейке II).

С небольшой помощью математики мы в состоянии пойти гораздо дальше. Можно установить, как велика, вернее, как мала должна быть длина волны, чтобы создать

индивидуальную картину дифракции. Таким образом, описанные эксперименты позволяют нам определить длину волны однородного света. Чтобы дать представление о том, как малы эти величины, мы укажем длины волн крайних лучей видимого солнечного спектра, т. е. длины волн красного и фиолетового лучей.

Длина волны красного света равна 0,00008 сантиметра.

Длина волны фиолетового света равна 0,00004 сантиметра.

Мы не должны удивляться, что эти величины очень малы. Точно очерченная тень, т. е. явление прямолинейного распространения света, наблюдается в природе лишь потому, что обычно встречающиеся отверстия и препятствия чрезвычайно велики по сравнению с длиной волны света. Свою волновую природу свет обнаруживает лишь тогда, когда применяются очень малые отверстия и препятствия.

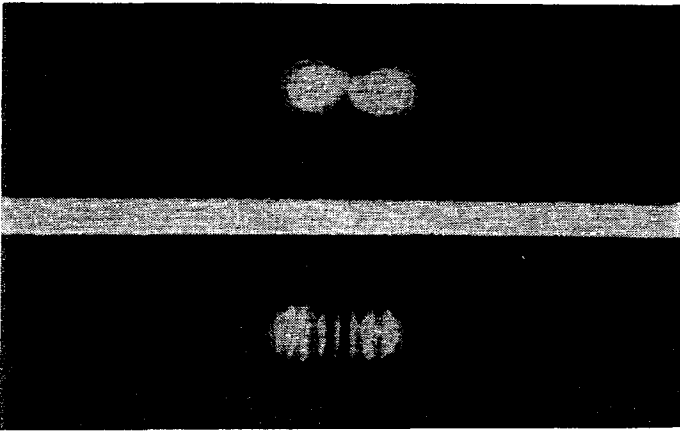
Но история поисков теории света никоим образом не окончена. Приговор девятнадцатого столетия не был последним и окончательным. Для современных физиков вся проблема выбора между корпускулами и волнами существует вновь, теперь уже в гораздо более глубокой и сложной форме. Примем поражение корпускулярной теории света до тех пор, пока мы не столкнемся с проблематичностью характера победы волновой теории.

## ПРОДОЛЬНЫ ИЛИ ПОПЕРЕЧНЫ СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ?

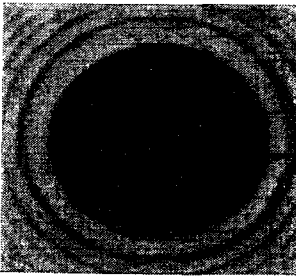
Все рассмотренные нами оптические явления говорят в пользу волновой теории. Изгибание света вокруг малых отверстий и препятствий и объяснение преломления — это самые сильные аргументы в ее пользу. Руководимые механистической точкой зрения, мы признаем, что остается еще один вопрос, на который следует ответить: определение механических свойств эфира. Для решения этой проблемы существенно знать, продольны или поперечны световые волны в эфире. Другими словами: распространяется ли свет подобно звуку? Вызвана ли волна изменением плотности среды, то есть совершаются ли колебания частиц в направлении распространения? Или



## ВКЛЕЙКА II



Вверху мы видим фотографию световых пятен после того как два луча прошли через два маленьких отверстия, один за другим (сначала была открыта одна щель; затем она закрывалась, а другая открывалась). Внизу мы видим полосы, полученные в результате того, что луч прошел через оба маленьких отверстия одновременно. (Сфотографировано В. Аркадьевым.)



Дифракция света в результате огибания лучом очень малого препятствия. (Сфотографировано В. Аркадьевым.)



Дифракция света в результате прохождения луча через очень малое отверстие. (Сфотографировано В. Аркадьевым.)



эфир похож на упругий студень — на среду, в которой могут осуществляться лишь поперечные волны и в которой частицы движутся в направлении, перпендикулярном к направлению распространения самих волн?

Прежде чем решить эту проблему, попробуем определить, какой ответ должен быть предпочтен. Очевидно, мы должны были бы радоваться, если бы световые волны оказались продольными. В этом случае трудности в описании механического эфира были бы не так велики. Картина строения эфира могла бы, вероятно, быть чем-то вроде механической картины строения газа, которая объясняет распространение звуковых волн. Было бы гораздо труднее создать картину строения эфира, передающего поперечные волны. Представить себе среду в виде студня или желе, построенную из частиц таким образом, что через нее распространяются поперечные волны, — это не легкая задача. Гюйгенс был убежден, что эфир скорее окажется «воздухообразным», чем «желеобразным». Но природа очень мало внимания обращает на наши трудности. Была ли природа в этом случае милосердна к попыткам физиков понять все явления с механистической точки зрения? Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны обсудить некоторые новые эксперименты.

Мы рассмотрим подробно лишь один из многих экспериментов, который в состоянии дать нам ответ. Предположим, что мы имеем очень тонкую пластинку из турмалинового кристалла, вырезанную особым образом, в описании которого здесь нет необходимости. Пластинка кристалла должна быть настолько тонка, чтобы можно было видеть сквозь нее источник света. Возьмем теперь две такие пластинки и поместим их между глазами и светом (рис. 41). Что мы увидим? Опять световую точку, если пластинки достаточно тонки. Очень велики шансы того, что эксперимент подтвердит наше ожидание. Не ставя себе целью установить, каковы эти шансы, допустим, что мы уже видим световую точку через оба кристалла. Будем теперь постепенно изменять положение одного кристалла, поворачивая его. Это предложение будет иметь смысл лишь в том случае, если положение оси, вокруг которой происходит вращение, фиксировано. Мы возьмем в качестве оси линию, определяемую проходящим лучом.

Это означает, что мы перемещаем все точки одного кристалла, кроме тех, которые лежат на оси. Но что за странная вещь! Свет делается все слабее и слабее, пока не исчезает совершенно. Затем он вновь появляется, по мере того, как продолжается вращение, и вновь приобретает

первоначальный вид, когда достигается первоначальное положение.

Не входя в детали подобных экспериментов, мы можем задать следующий вопрос: можно ли объяснить эти явления, если световые волны продольны? Если бы волны были продольны, частицы эфира должны были бы двигаться вдоль оси, т. е. в том же направлении, в каком идет луч. Если кристалл вращается, ничего вдоль оси не изменяется. Точки на оси не передвигаются, и лишь очень небольшое смещение имеет место вблизи оси. Такого ясно различного изменения, как уничтожение и появление вновь световой картины, не могло бы возникнуть для продольной волны. Это, а также и многие другие подобные явления, могут быть объяснены лишь

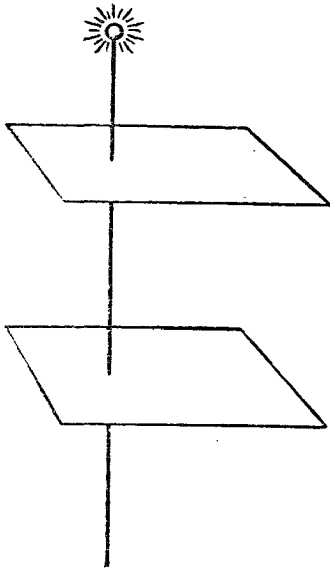


Рис. 41.

в том случае, если предположить, что световые волны не продольны, а поперечны! Или, другими словами, нужно предположить «желеобразный» характер эфира.

Это очень печально! Мы должны подготовиться к встрече непреодолимых трудностей в попытке механического описания эфира!

## ЭФИР И МЕХАНИСТИЧЕСКОЕ ВОЗЗРЕНИЕ

Обсуждение всех различных попыток описать механическую природу эфира как среды, передающей свет, привело бы к длинной истории. Механическая конструкция означает, как мы знаем, что субстанция состоит из частиц,

между которыми вдоль прямой линии, соединяющей их, действуют силы, зависящие только от расстояния. Для того чтобы построить эфир в виде желеобразной механической субстанции, физики должны принять несколько чрезвычайно неестественных предположений. Мы не будем приводить их здесь: они относятся к почти забытому прошлому. Но результат был значителен и важен. Искусственный характер всех этих предположений, необходимость введения такого множества их, причем все они совершенно независимы друг от друга, — все это было достаточным, чтобы разбить уверенность в механистической точке зрения.

Но имеются другие и более простые возражения против эфира, чем трудности его построения. Если мы хотим объяснить оптические явления механистически, то следует предположить, что эфир существует повсюду. Если свет передается только в среде, то не может быть никакого пустого пространства.

Однако из механики мы знаем, что межзвездное пространство не оказывает сопротивления движению материальных тел. Планеты, например, проходят через эфир-желе, не встречая какого-либо сопротивления своему движению, которое должна была бы оказать материальная среда. Если же эфир не нарушает движения вещества, то не может быть никакого взаимодействия между частицами эфира и частицами вещества. Свет проходит через эфир, а также через стекло и воду, но его скорость изменяется в последних субстанциях. Как можно объяснить этот факт механистически? По-видимому, лишь предполагая некоторое взаимодействие между частицами эфира и частицами вещества. Мы только что видели, что для свободно движущихся тел следует предположить, что такого взаимодействия не существует. Другими словами, существует взаимодействие между эфиром и веществом в оптических явлениях, но никакого взаимодействия в механических явлениях! Это, конечно, очень парадоксальное заключение!

По-видимому, из всех этих трудностей будет единственный выход. При попытке понять явления природы с механистической точки зрения на всем протяжении развития науки до двадцатого столетия было необходимо вводить

искусственные субстанции, такие, как электрические и магнитные жидкости, световые корпускулы или эфир. Результатом было только то, что все эти трудности концентрировались в нескольких существенных пунктах, таких, как эфир, в случае оптических явлений. Здесь все бесполезные попытки построить эфир простым путем, так же как и другие возражения, обнаруживают, что ошибка лежит в фундаментальном положении о том, что все явления в природе можно объяснить с механистической точки зрения. Наука не имела успеха в последовательном проведении механистической программы и сегодня ни один физик не верит в возможность ее выполнения.

В нашем кратком обозрении принципиальных идей физики мы встретили ряд нерешенных проблем, пришли к трудностям и препятствиям, которые обескуражили ученых в попытках сформулировать единое и последовательное воззрение на все явления внешнего мира. В классической механике мы встретили незамеченную руководящую нить исследования — равенство тяжелой и инертной масс. Обнаружен искусственный характер электрической и магнитной жидкостей. Во взаимодействии между электрическим током и магнитной иглой встретились неразрешенные трудности. Следует напомнить, что эта сила действовала не по линии, соединяющей проводник и магнитный полюс, и зависела от скорости движущегося заряда. Закон, выражающий ее направление и величину, был чрезвычайно сложен. И, наконец, установлено наличие больших трудностей с эфиром.

Современная физика атаковала все эти проблемы и решила их. Но в борьбе за эти решения возникли новые и более глубокие проблемы. Наши знания теперь шире и глубже, чем знания физика девятнадцатого столетия, но таковы же и наши сомнения и трудности.

#### *Подведем итоги:*

*В старой теории электрических жидкостей, в корпускулярной и волновой теориях света мы видим дальнейшие попытки применить механистическое воззрение. Но в области электрических и оптических явлений это применение встречает большие трудности.*

*Движущийся заряд действует на магнитную иглу, причем сила зависит не только от расстояния, но и от скорости заряда. Сила эта не отталкивает, и не притягивает, а действует перпендикулярно к линии, соединяющей иглу и заряд.*

*В оптике мы должны отдать предпочтение волновой теории света перед корпускулярной. Волны, распространяющиеся в среде, состоящей из частиц, между которыми действуют механические силы, — это, конечно, механическое понятие. Но что это за среда, в которой распространяется свет, и каковы ее механические свойства? Пока этот вопрос остается без ответа, нет никаких надежд свести оптические явления к механическим. Но трудности в разрешении этой проблемы так велики, что мы должны отказаться от этого пути, а стало быть, должны отказаться и от механистических воззрений.*

### III. ПОЛЕ И ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

---

*Поле как представление. — Две основы теории поля. — Реальность поля. — Поле и эфир. — Механические леса. — Эфир и движение. — Время, пространство, относительность. — Относительность и механика. — Пространственно-временной континуум. — Общая относительность. Вне и внутри лифта. — Геометрия и опыт. — Общая относительность и ее экспериментальная проверка. — Поле и вещество.*

#### ПОЛЕ КАК ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Во второй половине девятнадцатого столетия в физику были введены новые и революционные идеи; они открыли путь к новому философскому взгляду, отличающемуся от механистического. Результаты работ Фарадея, Максвелла и Герца привели к развитию современной физики, к созданию новых понятий, образующих новую картину действительности.

Наша задача сейчас — описать переворот, произведенный в науке этими новыми понятиями, и показать, как они постепенно приобрели ясность и силу. Мы постараемся построить линию развития логически, не очень заботясь о хронологическом порядке.

Новые понятия возникли в связи с изучением электрических явлений, но проще ввести их впервые через механику. Мы знаем, что две частицы притягивают друг друга и что сила их притяжения уменьшается с квадратом расстояния. Мы можем изобразить этот факт иным образом, что мы и сделаем, хотя и трудно понять преимущества нового метода. Маленький круг на рисунке 42 представляет притягивающее тело, скажем, Солнце. В действительности нашу картину следовало бы представить как модель в пространстве, а не как рисунок на плоскости. Тогда небольшой круг стал бы в пространстве сферой, представляющей Солнце. Тело, которое мы будем называть *пробным телом*, помещенное куда-либо по соседству с Солнцем, будет притягиваться к Солнцу, причем сила притяжения будет направлена по линии, соединяющей центры обоих тел. Таким образом, линии на нашем рисунке указывают на-



правление силы притяжения Солнца для различных положений пробного тела. Стрелки на каждой линии показывают, что сила направлена к Солнцу; это означает, что данная сила есть сила притяжения. Это — *силовые линии поля тяготения*. Пока это только название, и нет основания останавливаться на нем подробнее. Наш рисунок имеет одну характерную черту, которую мы рассмотрим

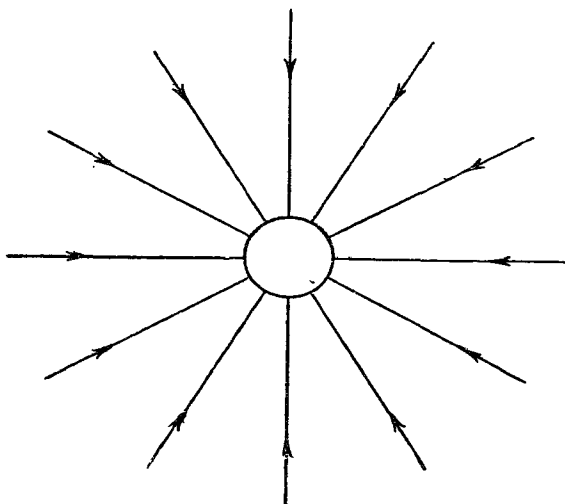


Рис. 42.

позднее. Силовые линии построены в пространстве, где нет никакого вещества. Пока все силовые линии, короче говоря, *поле*, показывают только, как будет вести себя пробное тело, помещенное вблизи сферического тела, для которого построено поле.

Линии в нашей пространственной модели всегда перпендикулярны к поверхности сферы. Поскольку они расходятся из одной точки, они более плотно расположены вблизи сферы и все более и более расходятся друг от друга по мере удаления от нее. Если мы увеличиваем расстояние от сферы в два или три раза, то плотность линий в нашей пространственной модели (но не на рисунке!) будет в четыре или в девять раз меньше. Таким образом, линии

служат двум целям. С одной стороны, они показывают направление сил, действующих на тело, помещенное по соседству со сферой — Солнцем, с другой стороны, плотность расположения силовых линий показывает, как сила изменяется с расстоянием. Изображение поля на рисунке, правильно истолкованное, характеризует направление силы тяготения и ее зависимость от расстояния. Из такого рисунка закон тяготения можно прочесть так же хорошо, как и из описания его действия словами, или же точным и скупым языком математики. Это *представление о поле*, как мы назовем его, может казаться ясным и интересным, но нет основания думать, что введение его означает какой-либо реальный прогресс. Было бы трудно доказать его полезность в случае тяготения. Может быть, кто-либо найдет полезным считать эти линии не просто рисунком, а чем-то большим, и представить себе реальные действия сил проходящими вдоль линий. Это можно сделать, но тогда скорость действия вдоль силовых линий нужно считать бесконечно большой. Сила, действующая между двумя телами, согласно закону Ньютона зависит только от расстояния; время не входит в рассмотрение. На передачу силы от одного тела к другому не требуется времени. Но, поскольку движение с бесконечной скоростью ничего не говорит всякому разумному человеку, постольку попытка сделать наш рисунок чем-либо большим, чем модель, ни к чему не приводит.

Но мы не намерены обсуждать сейчас проблему тяготения. Она послужила нам лишь введением, упрощающим объяснение аналогичных методов рассуждения в теории электричества.

Мы начнем с обсуждения эксперимента, который привел к серьезным трудностям в механистическом воззрении. Пусть мы имеем ток, текущей по проводнику, имеющему форму окружности. В центре этого витка находится магнитная игла. В момент возникновения тока появляется новая сила, действующая на магнитный полюс и перпендикулярная к линии, соединяющей проволоку и полюс. Эта сила, вызванная кругообращающимся зарядом, зависит, как показал опыт Роуланда, от скорости заряда. Эти экспериментальные факты противоречат философскому взгляду, согласно которому все силы должны действовать по линии,

соединяющей частицы, и могут зависеть только от расстояния.

Точное выражение для силы, с которой ток действует на магнитный полюс, очень сложно; в самом деле, оно гораздо сложнее выражения сил тяготения. Но мы можем постараться представить ее действия так же отчетливо, как это мы делали в случае силы тяготения. Наш вопрос таков: с какой силой действует ток на магнитный полюс, помещенный где-либо поблизости от проводника, по которому идет ток? Было бы довольно трудно описать эту силу словами. Даже математическая формула была бы сложной

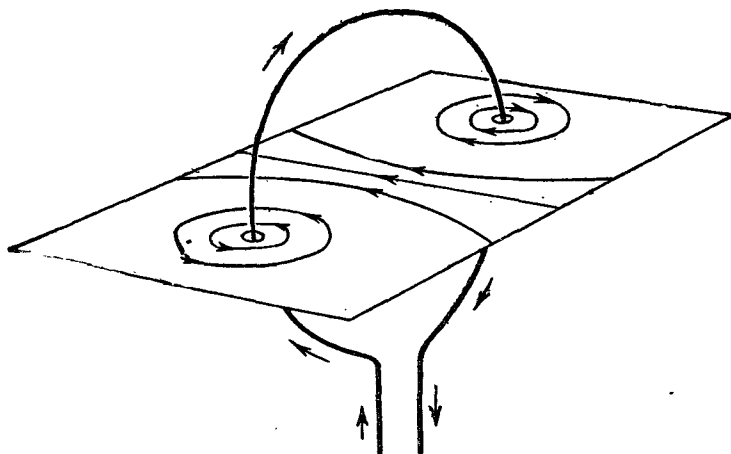


Рис. 43.

и неудобной. Гораздо лучше представить все, что мы знаем о действии сил, с помощью рисунка, или, вернее, с помощью пространственной модели с силовыми линиями. Некоторые трудности вызваны тем, что магнитный полюс существует только в связи с другим магнитным полюсом, образуя диполь. Однако мы всегда можем вообразить себе магнитный диполь такой длины, что можно будет учитывать силу, действующую только на тот полюс, который помещен вблизи тока. Другой же полюс можно считать настолько удаленным, что силу, действующую на него, можно не принимать во внимание. Чтобы избежать неопре-

деленности, будем считать, что магнитный полюс, помещенный вблизи проволоки, является *положительным*.

Характер силы, действующей на положительный магнитный полюс, можно увидеть из рисунка 43.

Стрелки около проволоки показывают направление тока от высшего потенциала к низшему.

Все другие линии — силовые линии поля этого тока, лежащие в определенной плоскости. Если рисунок сделан должным образом, то эти линии дают нам представление как о направлении силового вектора, характеризующего действие тока на данный магнитный полюс, так и о длине этого вектора. Сила, как мы знаем, является вектором, и, чтобы определить ее, мы должны знать направление вектора и его длину. Нас интересует, главным образом, вопрос о направлении силы, действующей на полюс. Наш вопрос таков: как можем мы найти, исходя из рисунка, направление силы в любой точке пространства?

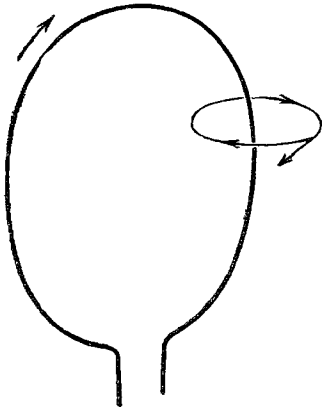


Рис. 44.

Правило определения направления силы для такой модели не так просто, как в предыдущем примере, где линии сил были прямыми. Чтобы облегчить рассуждения, на следующей диаграмме (рис. 44) нарисована только одна

силовая линия. Силовой вектор лежит на касательной к силовой линии, как указано на рисунке. Стрелка силового вектора совпадает по направлению со стрелками на силовых линиях. Следовательно, это — направление, в котором сила действует на магнитный полюс в данной точке. Хороший рисунок или, вернее, хорошая модель, говорит нам кое-что также и о длине силового вектора в любой точке. Этот вектор должен быть длиннее там, где линии расположены более плотно, т. е. вблизи проводника, и короче там, где линии расположены менее плотно, т. е. вдали от проводника.

Этим методом силовые линии или, другими словами, поле позволяют нам определить силы, действующие на

магнитный полюс в любой точке пространства. Пока это — единственное оправдание для тщательного построения поля. Зная, что выражает поле, мы рассмотрим с более глубоким интересом силовые линии, соответствующие току. Эти линии суть окружности; они окружают проводник и лежат в плоскости, перпендикулярной к плоскости, в которой расположен проводник. Рассматривая характер силы по рисунку, мы еще раз приходим к заключению, что сила действует в направлении, перпендикулярном к любой линии, соединяющей проводник и полюс, ибо касательная к окружности всегда перпендикулярна к ее радиусу. Все наше знание о действии сил мы можем суммарно выразить в построении поля. Мы вводим понятие поля наряду с понятиями о токе и о магнитном полюсе для того, чтобы более просто представить действующие силы.

Всякий ток связан с магнитным полем, иначе говоря, на магнитный полюс, помещенный вблизи проводника, по которому течет ток, всегда действует некоторая сила. Заметим мимоходом, что это свойство тока позволяет нам построить чувствительный прибор для обнаружения тока. Научившись однажды распознавать характер магнитных сил из модели поля, связанного с током, мы всегда будем рисовать поле, окружающее проводник, по которому течет ток, чтобы представить действие магнитных сил в любой точке пространства. В качестве первого примера мы рассмотрим так называемый соленоид. Он представляет собой спираль из проволоки, как это показано на рисунке 45. Наша задача изучить с помощью опыта все, что можно знать о магнитном поле, связанном с током, текущим по соленоиду, и объединить эти знания в построении поля. Рисунок представляет нам результат. Искривленные линии сил замкнуты; они окружают соленоид, характеризуя магнитное поле тока.

Поле, образуемое магнитным стержнем, может быть представлено таким же путем, как и поле тока. Следующий рисунок показывает это. Силовые линии направлены от положительного полюса к отрицательному. Силовой вектор всегда лежит на касательной к силовой линии и является наибольшим вблизи полюса, потому что силовые линии расположены наиболее густо именно в этих местах. Силовой вектор выражает действие магнита на положи-

тельный магнитный полюс. В этом случае магнит, а не ток, является «источником» поля.

Следует внимательно сравнить два последних рисунка. В первом случае мы имеем магнитное поле тока, текущего

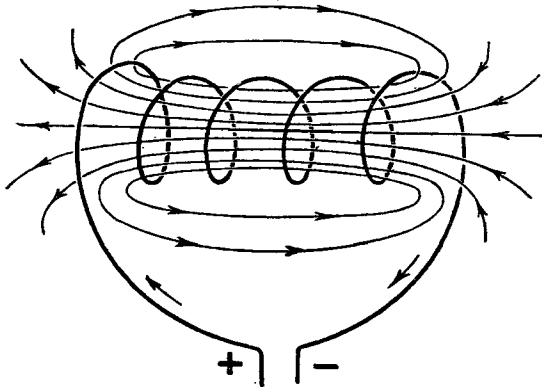


Рис. 45.

по соленоиду; во втором — поле магнитного стержня. Не будем обращать внимания на соленоид и стержень, а рассмотрим только внешние поля, ими создаваемые. Мы сразу же замечаем, что они имеют совершенно одинаковый

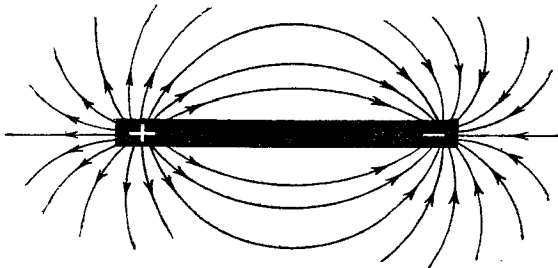


Рис. 46.

характер; в обоих случаях силовые линии идут от одного конца — соленоида или стержня — к другому.

Представление о поле приносит свой первый плод! Весьма трудно было бы усмотреть какое-либо ярко выраженное сходство между током, текущим по соленоиду, и магнитным стержнем, если бы это не обнаруживалось строением поля.

Понятие поля теперь может быть применено к гораздо более серьезной задаче. Скоро мы увидим, есть ли оно нечто большее, чем новое представление действующих сил. Мы могли бы сказать: допустим на минуту, что поле и только оно характеризует одинаковым образом все действия, определяемые его источником. Это только предположение. Оно означало бы, что если соленоид и магнит имеют одинаковое поле, то и все их действия должны быть также одинаковыми. Оно означало бы, что два соленоида, по которым течет электрический ток, ведут себя подобно двум магнитным стержням; что они притягивают или отталкивают друг друга, в зависимости от их взаимного положения, совершенно так же, как это имеет место и в случае магнитных стержней. Оно означало бы также, что соленоид и стержень притягивают и отталкивают друг друга таким же образом, как и два стержня. Короче говоря, оно означало бы, что все действия соленоида, по которому течет ток, и действия соответствующего магнитного стержня являются одинаковыми, так как существенно одно лишь поле, а поле в обоих случаях имеет одинаковый характер. Эксперимент полностью подтверждает наше предположение!

Как трудно было бы предвидеть эти факты без понятия поля! Выражение для силы, действующей между проводником, по которому течет ток, и магнитным полюсом, очень сложно. В случае двух соленоидов мы должны были бы исследовать силы, с которыми оба тока действуют друг на друга. Но если мы делаем это с помощью поля, мы сразу же определяем характер всех этих действий, как только обнаруживается сходство между полем соленоида и полем магнитного стержня.

Мы имеем право считать, что поле есть нечто гораздо большее, чем думали сначала. Свойства самого поля оказываются существенными для описания явления. Различие же источников поля несущественно. Значение понятия поля обнаруживается в том, что оно ведет к новым экспериментальным фактам.

Поле оказывается очень полезным понятием. Оно возникло как нечто, помещенное между источником и магнитной иглой, для того чтобы описать действующую силу. О нем думали, как об «агенте» тока, через который выпол-

нялись все действия тока. Но теперь агент действует и как переводчик, переводящий законы на простой, ясный, легко понимаемый язык.

Первый успех описания с помощью поля показал, что оно может быть удобным для рассмотрения всех действий токов, магнитов и зарядов, т. е. рассмотрения не непосредственного, а с помощью поля как переводчика. Поле можно рассматривать как нечто, всегда связанное с током. Оно существует, даже если отсутствует магнитный

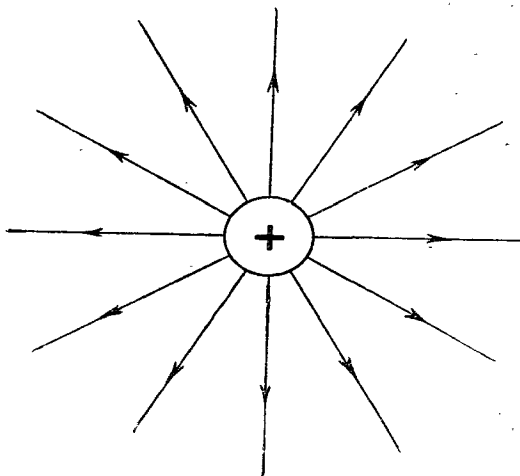


Рис. 47.

полюс, с помощью которого можно обнаружить его наличие. Постараемся последовательно идти за этой новой руководящей нитью.

Поле заряженного проводника может быть введено почти таким же образом, как и поле тяготения или поле тока или магнита. Возьмем снова наипростейший пример. Чтобы нарисовать поле положительно заряженной сферы, мы должны задать вопрос: какого рода силы действуют на маленькое положительно заряженное пробное тело, помещенное вблизи источника поля, т. е. вблизи заряженной сферы? Тот факт, что мы берем положительно, а не отрицательно заряженное пробное тело, является простым соглашением, которое определяет, в каком направлении



должны быть нарисованы стрелки силовых линий. Эта модель (рис. 47) аналогична модели поля тяготения (стр. 103) в силу сходства законов Кулона и Ньютона. Единственное различие между обеими моделями состоит в том, что стрелки расположены в противоположных направлениях. В самом деле, два положительных заряда отталкиваются, а две массы притягиваются. Однако поле

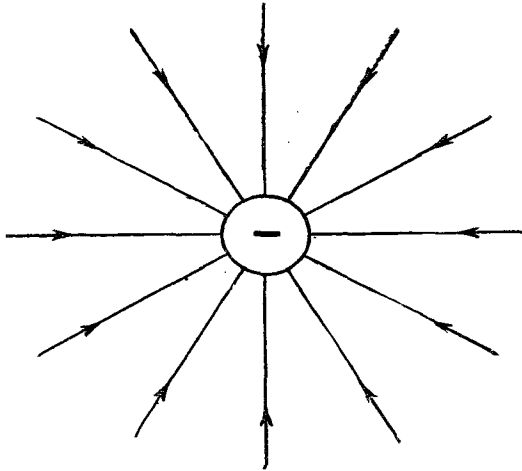


Рис. 48.

сферы с отрицательным зарядом (рис. 48) будет идентично полю тяготения, так как маленький положительный пробный заряд будет притягиваться источником поля.

Если и электрический заряд и магнитный полюс находятся в покое, то между ними нет никакого взаимного действия: ни притяжения, ни отталкивания. Выражая подобный факт на языке поля, мы можем сказать: электростатическое поле не влияет на магнитостатическое, и наоборот. Слова «статическое поле» означают, что речь идет о поле, не изменяющемся со временем. Магниты и заряды могли бы вечно оставаться друг подле друга, если бы никакая внешняя сила не нарушала их состояния. Электростатические, магнитостатические и гравитационные поля различны по своему характеру. Они не смешиваются: каждое сохраняет свою индивидуальность независимо от других.

Вернемся к электрической сфере, которая до сих пор была в покое, и предположим, что она пришла в движение благодаря действию некоторой внешней силы. Заряженная сфера движется. На языке поля это выражение означает: поле электрического заряда изменяется со временем. Но движение этой заряженной сферы эквивалентно току, как мы уже знаем это из опыта Роуланда. Далее, каждый ток сопровождается магнитным полем. Таким образом, цепь наших выводов такова:

движение заряда → изменение электрического поля



ток → магнитное поле, связанное с током.

Поэтому мы заключаем: *изменение электрического поля, произведенное движением заряда, всегда сопровождается магнитным полем.*

Наше заключение основано на опыте Эрстеда, но оно содержит в себе нечто большее. Оно содержит признание того, что связь электрического поля, изменяющегося со временем, с магнитным полем весьма существенна для наших дальнейших выводов.

Поскольку заряд остается в покое, существует только электростатическое поле. Но как только заряд приходит в движение, возникает магнитное поле. Мы можем сказать больше. Магнитное поле, вызванное движением заряда, будет тем сильнее, чем больше заряд и чем быстрее он движется. Это тоже есть вывод из опыта Роуланда. Используя вновь язык поля, мы можем сказать: чем быстрее изменяется электрическое поле, тем сильнее сопровождающее его магнитное поле.

Мы постараемся здесь перевести известные уже нам факты с языка теории жидкостей, развитого соответственно старым механистическим взглядам, на новый язык поля. Позднее мы увидим, как ясен, поучителен и всеобъемлющ наш новый язык.

## ДВЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОЛЯ

«Изменение электрического поля сопровождается магнитным полем». Если поменять слова «магнитное» и «электрическое», то предложение будет выглядеть так: «изменение магнитного поля сопровождается электричес-

ким полем». Справедливо это положение или нет, может решить только эксперимент. Но сама идея сформулировать это положение внушена применением языка поля.

Немного более ста лет назад Фарадей выполнил эксперимент, приведший к великому открытию индукционных токов.

Демонстрация этого явления очень проста (рис. 49). Необходимо только соленоид или несколько витков проволоки, магнитный стержень, а также какой-либо один из многообразных приборов для обнаружения электрического тока. Начнем с того, что магнитный стержень оставим в покое около соленоида, образующего замкнутую цепь.

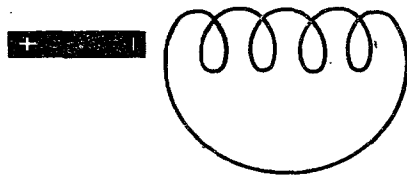


Рис. 49.

Никакого тока по проводнику не течет, потому что нет никакого источника. Существует только магнитостатическое поле магнитного стержня, не изменяющееся со временем. Теперь мы быстро изменяем положение магнита, либо удаляя его, либо приближая к соленоиду, по своему усмотрению. В этот момент в проводнике на короткое время появится ток, а затем исчезнет. Всякий раз, как изменяется положение магнита, вновь появляется ток; его можно обнаружить достаточно чувствительным прибором. Но с точки зрения теории поля ток означает наличие электрического поля, вызывающего поток электрических жидкостей в проводнике. Ток, а стало быть, и электрическое поле исчезают, когда магнит вновь приходит в состояние покоя.

Представим себе, что язык поля нам незнаком и результаты этого опыта должны быть описаны количественно и качественно на языке старых механических понятий. Тогда наш опыт показывает следующее: благодаря движению магнитного диполя возбуждена новая сила,двигающая электрические жидкости в проводнике. Возникает вопрос: от чего зависит эта сила? Ответить было бы очень трудно. Мы должны были бы исследовать зависимость силы от скорости магнита, от его формы и от формы витков. Больше того, будучи истолкован на старом языке, этот эксперимент вообще не дал бы нам никакого указания

на то, может ли появиться индукционный ток благодаря движению другого соленоида, по которому течет ток и которым мы заменим движущийся магнитный стержень.

Совершенно иным оказывается дело, если мы применяем язык поля и вновь полагаемся на тот принцип, что

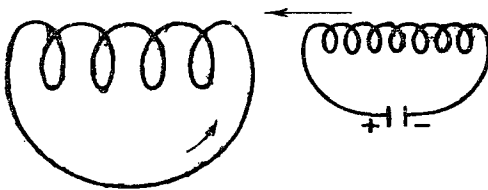


Рис. 50.

действие определяется полем. Мы сразу видим, что соленоид, по которому течет ток, будет действовать так же, как и магнитный стержень. Рисунок 50 изображает два соленоида: один небольшой, по которому течет ток, а дру-

гой побольше, в котором обнаруживается индукционный ток. Мы могли бы двигать малый соленоид, как раньше двигали магнитный стержень, возбуждая в большем соленоиде индукционный ток. Больше того, вместо движения

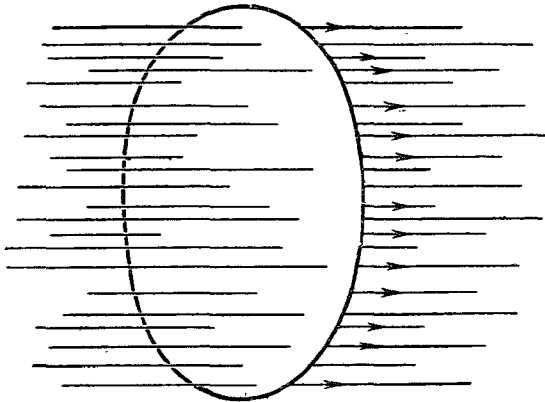


Рис. 51.

малого соленоида мы могли бы возбуждать и нарушать магнитное поле возбуждением и разрывом тока, т. е. замыканием и размыканием цепи. Еще раз новые предсказания теории поля подтверждаются опытом!

Возьмем более простой пример. Пусть мы имеем замкнутую цепь без всякого источника тока. Пусть где-либо

поблизости имеется магнитное поле. Для нас безразлично, является ли источником этого магнитного поля другой виток, по которому течет ток, или же магнитный стержень. Рисунок 51 изображает замкнутый виток и магнитные силовые линии. Качественное и количественное описание индукционных явлений является очень простым в терминологии поля. Как видно из рисунка, некоторые силовые линии проходят через круг, ограниченный витком. Мы должны рассмотреть силовые линии, проходящие через часть плоскости, охватываемую витком. До тех пор, пока поле остается неизменным, никакого тока нет, как бы ни была велика сила поля. Но как только изменяется число силовых линий, проходящих через круг, окруженный замкнутой цепью, так в ней возникает ток. Ток определяется изменением числа силовых линий, проходящих через поверхность, независимо от того, чем вызывается это изменение. Это изменение числа силовых линий является единственным существенным понятием как для качественного, так и для количественного описания индукционного тока. «Число линий изменяется» — это означает, что изменяется плотность линий, а это, как мы помним, означает, что изменяется сила поля.

Существенными моментами в цепи наших рассуждений являются: изменение магнитного поля → индукционный ток → движение зарядов → наличие электрического поля.

Отсюда следует: *изменяющееся магнитное поле сопровождается электрическим полем.*

Таким образом, мы нашли две наиболее важные основы для теории электрического и магнитного поля. Первая — это связь между изменяющимся электрическим полем и магнитным полем. Она основана на опыте Эрстеда, обнаружившем отклонение магнитной иглы под действием поля тока, и приводит к выводу: *изменяющееся электрическое поле сопровождается магнитным полем.*

Вторая связывает изменяющееся магнитное поле с индукционным током и основана на опыте Фарадея. Обе они составляют основу количественного описания.

И снова электрическое поле, сопровождающее изменяющееся магнитное поле, выступает как нечто реальное. Мы уже раньше должны были предположить, что магнитное поле тока существует и в отсутствии пробного полюса.

Подобным же образом мы должны считать, что и электрическое поле существует в отсутствии замкнутого проводника, устанавливающего наличие индукционного тока.

Фактически две основы, на которых строится поле, можно свести к одной-единственной, а именно к результатам опыта Эрстеда. Из них при помощи закона сохранения энергии можно вывести и результаты опыта Фарадея. Мы прибегали к двум основам только ради ясности и экономии.

Необходимо упомянуть еще об одном следствии полевой теоремы. Пусть имеется виток, по которому течет ток, возникающий, например, от батареи Вольта. Внезапно связь проводника с источником тока разрывается. Теперь, конечно, никакого тока нет! Но в момент этого короткого разрыва имеет место сложный процесс, который опять-таки может быть предсказан теорией поля. Перед разрывом тока вокруг проводника существовало магнитное поле. Оно перестало существовать в момент, когда ток был прерван. Следовательно, из-за разрыва тока магнитное поле исчезло. Число силовых линий, проходящих через поверхность, окруженную цепью, очень быстро изменилось. Но такое быстрое изменение, как бы оно ни осуществлялось, должно вызвать индукционный ток. Что действительно имеет значение, — так это изменение магнитного поля, возбуждающее индукционный ток, тем более сильный, чем значительнее изменение поля. Этот вывод является другой проверкой теории. Разрыв тока должен сопровождаться возникновением сильного кратковременного индукционного тока. Эксперимент снова подтверждает предсказание теории. Тот, кто когда-либо разрывал ток, должен был заметить, что при этом появляется искра. Эта искра указывает на огромную разность потенциалов, вызванную быстрым изменением магнитного поля.

Тот же самый процесс можно рассмотреть с другой точки зрения, с точки зрения энергии. Магнитное поле исчезло, но появилась искра. Искра обладает некоторой энергией, поэтому и магнитное поле должно обладать энергией. Чтобы последовательно применять понятие поля и его язык, мы должны рассматривать магнитное поле как запас энергии. Только встав на этот путь, мы будем в состоянии описать магнитные и электрические явления в согласии с законом сохранения энергии.

Будучи вначале лишь вспомогательной моделью, поле становится все более и более реальным. Оно помогло нам понять уже известные факты и привело к новым. Приписывание полю энергии является дальнейшим шагом в развитии, в котором понятие поля оказывается все более существенным, а субстанциональные концепции, свойственные механистической точке зрения, все более отходят на задний план.

## РЕАЛЬНОСТЬ ПОЛЯ

Количественная, математическая формулировка законов поля дана в так называемых уравнениях Максвелла. Указанные выше факты привели к формулировке этих уравнений, но содержание их значительно богаче, чем мы могли показать. Их простая форма скрывает глубину, обнаруживаемую только при тщательном изучении.

Формулировка этих уравнений является самым важным событием со времени Ньютона не только вследствие ценности их содержания, но и потому, что они дают образец нового типа законов.

Характерную особенность уравнений Максвелла, которая проявляется и во всех других уравнениях современной физики, можно выразить в одном предложении: уравнения Максвелла суть законы, выражающие структуру поля.

Почему уравнения Максвелла отличаются по своей форме и характеру от уравнений классической механики? Что означает утверждение, что эти уравнения описывают структуру поля? Как это возможно, что в результате опытов Эрстеда и Фарадея мы можем образовать новый тип закона, который оказывается столь важным для дальнейшего развития физики?

Мы уже видели из опыта Эрстеда, как силовые линии магнитного поля закручиваются вокруг изменяющегося электрического поля. А из опыта Фарадея мы видели, как силовые линии электрического поля закручиваются вокруг изменяющегося магнитного поля. Чтобы обрисовать некоторые характерные особенности теории Максвелла, сосредоточим все внимание на одном из этих опытов,

скажем, на опыте Фарадея. Повторим рисунок, показывающий, как электрический ток индуцируется под влиянием изменяющегося магнитного поля. Мы уже знаем, что индукционный ток возникает при изменении числа силовых линий, проходящих сквозь поверхность, ограниченную проводником. Ток возникнет тогда, когда изменится магнитное поле, или деформируется виток, или когда

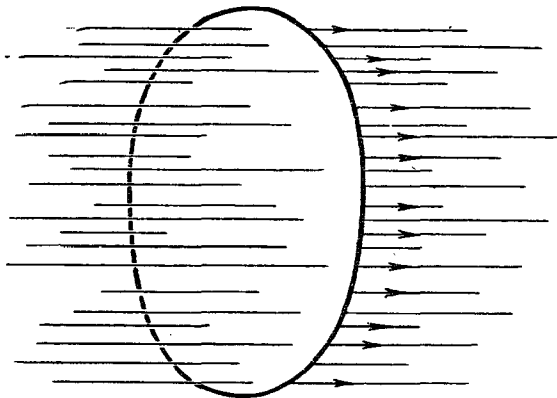


Рис. 52.

он будет двигаться, словом, когда изменится число магнитных линий, проходящих через поверхность, независимо от того, чем вызвано это изменение. Если бы нужно было учитывать все эти различные возможности, обсуждать частные влияния каждой из них, то это привело бы к очень сложной теории. Но не можем ли мы упростить нашу задачу? Постараемся исключить из нашего рассмотрения все, что относится к форме витка, к его длине, к поверхности, ограниченной проводником. Представим себе, что виток, изображенный на последней фигуре, становится все меньше и меньше, постепенно стягиваясь к очень малому витку, заключающему в себе лишь некоторую точку пространства. Тогда все, касающееся величины и формы, становится несущественным. В этом предельном случае, когда замкнутая кривая стягивается к точке, величина и форма ее автоматически исчезают из нашего рассмотрения, и мы получаем законы, связывающие изменения



магнитного и электрического полей в любой момент, в любой точке пространства.

Это один из принципиальных шагов, ведущий к уравнениям Максвелла. Он опять-таки является идеализированным опытом, выполненным в воображении путем повторения опыта Фарадея с витком, стягивающимся к точке.

Фактически его следовало бы назвать скорее полшагом, чем целым шагом. До сих пор наше внимание было сосредоточено на опыте Фарадея. Но так же внимательно и подобным же образом нужно рассмотреть и другую основу теории поля, опирающуюся на опыт Эрстеда. В этом опыте магнитные силовые линии замыкаются вокруг тока. Стягивая витки магнитных силовых линий к точке, мы выполняем вторую половину шага, а весь шаг дает связь между изменениями магнитных и электрических полей в любой точке пространства и в любой момент.

Но необходим еще другой существенный шаг. Согласно опыту Фарадея необходим проводник, с помощью которого обнаруживается наличие электрического поля, так же как в опыте Эрстеда необходим магнитный полюс или игла, обнаруживающая наличие магнитного поля. Новые теоретические идеи Максвелла идут дальше этих экспериментальных фактов. Электрическое и магнитное поля или, короче, *электромагнитное* поле является, согласно теории Максвелла, чем-то реальным. Электрическое поле создается изменяющимся магнитным полем совершенно независимо от того, имеется ли проводник для обнаружения его существования. Магнитное поле создается изменяющимся электрическим полем независимо от того, имеется ли магнитный полюс для обнаружения его существования.

Таким образом, к уравнениям Максвелла приводят два существенных шага. Первый шаг: в рассмотренных опытах Эрстеда и Роуленда круговые линии магнитного поля, замыкающиеся вокруг тока, и изменяющегося электрического поля должны быть стянуты к точке; в рассмотренном опыте Фарадея круговые линии электрического поля, замыкающиеся вокруг изменяющегося магнитного поля, тоже должны быть стянуты к точке. Второй шаг состоит в трактовке поля как чего-то реального. Созданное однажды электромагнитное поле существует, действует и изменяется согласно законам Максвелла.

Уравнения Максвелла описывают структуру электромагнитного поля. Ареной этих законов является все пространство, а не одни только точки, в которых находятся вещество или заряды, как это имеет место для механических законов.

Вспомним, как было в механике. Зная положение и скорость частиц в начальный момент времени, зная действующие силы, можно предвидеть всю траекторию, которую частица опишет в будущем. В теории Максвелла, если только мы знаем поле в какой-либо момент времени, мы можем вывести из уравнений, установленных этой теорией, как будет изменяться все поле в пространстве и во времени. Уравнения Максвелла позволяют нам следовать за историей поля так же, как уравнения механики позволяли следовать за историей материальных частиц.

Но имеется еще одно существенное различие между механическими законами и законами Максвелла. Сравнение законов тяготения Ньютона и законов поля Максвелла подчеркнет некоторые характерные черты, выраженные этими уравнениями.

С помощью законов Ньютона мы можем вывести движение Земли, зная силу, действующую между Солнцем и Землей. Эти законы связывают движение Земли с действием отдаленного Солнца. И Земля, и Солнце, хотя они и далеки друг от друга, оба принимают участие в игре сил.

В теории Максвелла нет вещественных участников действия. Математические уравнения этой теории выражают законы, управляющие электромагнитным полем. Они не связывают, как это имеет место в законах Ньютона, два широко разделенных события, они не связывают события *здесь* с условиями *там*. Поле *здесь* и *теперь* зависит от поля в *непосредственном соседстве* в момент, *только что протекший*. Уравнения позволяют нам предвидеть, что случится немного дальше в пространстве и немного позднее во времени, если мы знаем, что происходит *здесь* и *теперь*. Они позволяют нам увеличивать наши знания поля малыми шагами. Мы можем вывести то, что происходит *здесь*, из того, что происходит *вдали*, путем суммирования этих очень малых шагов. В теории же Ньютона, наоборот, допустимы только большие шаги, связывающие отдаленные события. Опыты Эрстеда и Фарадея можно

рассмотреть с точки зрения теории Максвелла, но только суммируя малые шаги, каждый из которых управляется уравнениями Максвелла.

Изучение уравнений Максвелла с математической стороны показывает, что из них можно сделать новые и действительно неожиданные заключения, а всю теорию можно испытать на гораздо более высоком уровне, потому что теоретические следствия теперь имеют количественный характер и обосновываются всей цепью логических аргументов.

Представим себе опять идеализированный опыт. Небольшая электрически заряженная сфера под влиянием внешних сил вынуждена быстро и ритмично колебаться, подобно маятнику. Как, опираясь на знания об изменениях поля, которые уже есть у нас, будем мы описывать на языке поля все, что при этом происходит?

Колебание заряда создает изменяющееся электрическое поле. Оно всегда сопровождается изменяющимся магнитным полем. Если поблизости расположен проводник, образующий замкнутую цепь, то изменяющееся магнитное поле будет сопровождаться электрическим током в цепи. Все это является лишь повторением известных фактов, но изучение уравнений Максвелла дает гораздо более глубокое проникновение в проблему колебания электрического заряда. С помощью математического вывода из уравнений Максвелла мы можем установить характер поля, окружающего колеблющийся заряд, его структуру вблизи и вдали от источника и его изменение со временем. Результатом такого вывода является представление об *электромагнитной волне*. От колеблющегося заряда излучается энергия, которая распространяется в пространстве с определенной скоростью; но передача энергии, движение состояния характерно для всех волновых явлений.

Мы уже рассматривали различные типы волн. Когда в среде распространялись изменения плотности, мы имели продольную волну, вызванную пульсацией сферы. В желеобразной среде распространялись поперечные волны. В этом случае через среду передавалась деформация желеобразной массы, вызванная вращением сферы. Но какого же рода изменения распространяются теперь, в случае электромагнитной волны? Это — изменения электромаг-

нитного поля! Всякое изменение электрического поля создает магнитное поле; всякое изменение этого магнитного поля создает электрическое поле; всякое изменение электрического... и так далее. Так как поле несет энергию, все эти изменения, распространяющиеся в пространстве с определенной скоростью, образуют волну. Электрические и магнитные силовые линии всегда лежат, как это выведено теоретически, в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения. Образовавшаяся волна является, следовательно, поперечной. Первоначальные черты картины поля, которую мы нарисовали на основе опытов Эрстеда и Фарадея, еще сохранены, но мы теперь устанавливаем, что поле имеет более глубокое значение.

Электромагнитная волна распространяется в пустом пространстве. Таков новый вывод этой теории. Если колеблющийся заряд перестает двигаться, то его поле становится электростатическим. Но серия волн, созданных колебанием заряда, продолжает распространяться. Волны ведут независимое существование, и история их изменений может быть прослежена так же, как и история любого другого материального объекта.

Мы приходим к заключению, что наша картина электромагнитной волны, распространяющейся с определенной скоростью в пространстве и изменяющейся со временем, вытекает из уравнений Максвелла только потому, что они описывают структуру электромагнитного поля в любой точке пространства и для любого момента времени.

Имеется другой очень важный вопрос. С какой скоростью распространяется электромагнитная волна в пространстве? Опираясь на некоторые данные, полученные из простых опытов, ничего общего не имеющих с действительным распространением волн, теория Максвелла дает ясный ответ: *скорость электромагнитных волн равна скорости света.*

Опыты Эрстеда и Фарадея создали основу, на которой построены законы Максвелла. Все наши так далеко идущие выводы основывались на внимательном изучении этих законов, выраженных на языке поля. Теоретическое открытие электромагнитной волны, распространяющейся со скоростью света, является одним из величайших достижений в истории науки.

Эксперимент подтвердил предсказания теории. Пятьдесят лет назад Герц впервые доказал существование электромагнитных волн и экспериментально подтвердил, что их скорость равна скорости света. В наши дни миллионы людей знают, как электромагнитные волны посылаются и принимаются. Их приборы гораздо более сложны, чем те, которые употреблял Герц, и они обнаруживают наличие волн не только за несколько метров, а даже за тысячи километров от их источника.

## ПОЛЕ И ЭФИР

Электромагнитная волна поперечна и распространяется со скоростью света в пустом пространстве. Тот факт, что скорости их равны, внушает мысль о тесной связи оптических и электромагнитных явлений.

Когда мы должны были выбирать между корпускулярной и волновой теорией, мы склонились к выбору волновой. Самым сильным аргументом, определившим наше решение, была дифракция света. Но мы не будем противоречить ни одному объяснению оптических фактов, если наряду с этим предположим, что *световая волна есть волна электромагнитная*. Напротив, можно сформулировать еще и другие заключения в пользу этого предположения. Если это действительно так, то должна существовать некоторая связь между оптическими и электрическими свойствами вещества, которую можно вывести из теории Максвелла. Тот факт, что такие заключения можно в действительности сделать и что они выдержали экспериментальную проверку, является существенным аргументом в пользу электромагнитной теории света.

Этот замечательный результат обязан теории поля. Две, казалось бы, не связанные ветви науки объединяются одной теорией. Одни и те же уравнения Максвелла описывают и электромагнитную индукцию, и оптическую рефракцию (преломление света). Если наша цель состоит в том, чтобы описать с помощью одной теории все, что когда-либо случилось или может случиться, то объединение оптики и электричества, несомненно, представляет собой очень большой шаг в этом направлении. С физической

точки зрения единственное различие между обычной электромагнитной волной и световой волной заключается в длине волны: она очень мала для световых волн, обнаруживаемых человеческим глазом, и велика для обычных электромагнитных волн, обнаруживаемых радиоприемником.

Старый механистический взгляд пытался свести все явления природы к силам, действующим между частицами вещества. На этом механистическом взгляде базировалась первая наивная теория электрических жидкостей. Для физика начала девятнадцатого столетия не существовало поля. Для него были реальными только субстанция и ее изменения. Он старался описать действие двух электрических зарядов только с помощью понятий, относящихся непосредственно к обоим зарядам.

Сначала понятие поля было не более, как прием, облегчающий понимание явлений с механической точки зрения. Наш новый язык — это описание поля между обоими зарядами, а не самих зарядов; описание поля и является существенным для понимания действия зарядов. Признание новых понятий постепенно росло, пока субстанция не была оттеснена на задний план полем. Стало ясно, что в физике произошло нечто весьма важное. Была создана новая реальность, новое понятие, для которого не было места в механистическом описании. Постепенно и не без борьбы понятие поля завоевало руководящее место в физике и сохранилось в качестве одного из основных физических понятий. Для современного физика электромагнитное поле столь же реально, как и стул, на котором он сидит.

Но было бы неверным считать, что новое воззрение — теория поля — освободило науку от заблуждений старой теории электрических жидкостей или что новая теория разрушает достижения старой. Новая теория выявляет как достоинства, так и ограниченность старой теории и позволяет нам оценить старые понятия с более глубокой точки зрения. Это справедливо не только по отношению к теориям электрических жидкостей и поля, но и по отношению ко всем изменениям в физических теориях, как бы революционны они ни казались. В теории Максвелла, например, мы еще находим понятие электрического заряда,

хотя заряд понимается только как источник электрического поля. Справедлив еще и закон Кулона; он содержится в уравнениях Максвелла, из которых его можно вывести в качестве одного из многих следствий. Мы можем применять старую теорию всякий раз, когда исследуются факты в той области, где она справедлива.

Но с таким же успехом мы можем применять и новую теорию, так как все известные факты заключены в тех пределах, в которых она справедлива.

Для сравнения мы могли бы сказать, что создание новой теории непохоже на разрушение старого амбара и возведение на его месте небоскреба. Оно скорее похоже на восхождение на гору, которое открывает новые и широкие виды, показывающие неожиданные связи между нашей отправной точкой и ее богатым окружением. Но точка, от которой мы отправлялись, еще существует и может быть видна, хотя она кажется меньше и составляет крохотную часть открывшегося нашему взору обширного ландшафта.

Этого положения, с которого открываются такие широкие перспективы, мы достигли в результате отважного преодоления препятствий на нашем пути вверх.

Правда, прошло много времени, прежде чем было признано богатое содержание теории Максвелла. Сперва поле рассматривали как нечто, что впоследствии можно будет истолковать механистически с помощью эфира. Со временем стало ясно, что эту программу нельзя осуществить, что достижения теории поля стали уже слишком поразительными и важными, чтобы их можно было заменить механистическими догмами. С другой стороны, задача придумывания механической модели эфира представлялась все менее и менее интересной, а результат, в силу вынужденного и искусственного характера допущений, все более и более обескураживающим.

Единственный выход — это допустить, что пространство обладает физическим свойством передавать электромагнитные волны, и не слишком много заботиться о смысле этого утверждения. Можно еще употреблять слово эфир, но только для того, чтобы выразить упомянутое физическое свойство пространства. Слово эфир изменяло свой смысл много раз в процессе развития науки. В данный

момент оно уже не употребляется для обозначения среды, построенной из частиц. Его история, никоим образом не законченная, продолжается теорией относительности.

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ЛЕСА

Достигнув этой стадии истории, мы должны вернуться к началу — к закону инерции Галилея. Мы процитируем его еще раз:

«Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если только оно не вынуждено изменить его под влиянием действующих сил».

Раз идея инерции понята, кажется удивительным, что же еще можно сказать о ней. Однако, хотя эта проблема подробно обсуждалась, она еще вовсе не исчерпана.

Представим себе серьезного ученого, полагающего, что закон инерции можно подтвердить или опровергнуть прямыми экспериментами. Он толкает небольшие шарики на поверхности горизонтального стола, стараясь по возможности исключить трение. Он замечает, что движение становится все более равномерным по мере того, как стол и шарики становятся все более гладкими. И вот в момент, когда он готов провозгласить принцип инерции, кто-то вдруг разыгрывает над ним шутку. Наш физик работает в комнате без окон и не имеет никакой связи с внешним миром. Шутник строит какой-то механизм, позволяющий ему быстро вращать всю комнату вокруг оси, проходящей через ее центр. Коль скоро вращение началось, наш физик наблюдает новые и неожиданные факты. Шар, только что двигавшийся равномерно, стремится теперь удалиться от центра и возможно ближе подкатиться к стенам комнаты. Он сам ощущает странную силу, толкающую его к стене. Он испытывает такое же чувство, как человек, находящийся в поезде или автомобиле, который едет по сильно закругленному пути или даже больше, как человек на вращающейся карусели. Все его предыдущие результаты разбиваются вдребезги.

Наш физик должен был бы вместе с законом инерции отбросить и все механические законы. Закон инерции был



его исходной точкой; если он меняется, то меняются и все его последующие выводы. Наблюдатель, решивший всю свою жизнь провести во вращающейся комнате и выполнить там все свои опыты, имел бы законы механики, отличные от наших. С другой стороны, если бы он вошел в комнату, уже обладая глубокими знаниями и твердой уверенностью в принципах физики, то он объяснил бы кажущееся нарушение законов механики, предположив, что комната вращается. Механическими опытами он мог бы установить, как именно она вращается.

Почему мы проявляем так много интереса к наблюдателю во вращающейся комнате? Просто потому, что мы на Земле находимся в известной степени в таком же положении. Со времени Коперника нам известно, что Земля вращается вокруг своей оси и движется вокруг Солнца. Даже эта простая идея, столь ясная для каждого, не осталась незатронутой прогрессом науки. Но оставим на время этот вопрос и примем точку зрения Коперника. Если бы наш вращающийся наблюдатель не мог подтвердить законы механики, то и мы на Земле не были бы в состоянии этого сделать. Но вращение Земли происходит сравнительно медленно, так что этот эффект не очень заметен. Тем не менее существует много опытов, показывающих небольшое отклонение от механических законов, и их взаимная согласованность может рассматриваться как доказательство вращения Земли.

К несчастью, мы не можем поместиться где-то между Солнцем и Землей, чтобы доказать там строгую справедливость закона инерции и взглянуть на вращающуюся Землю. Это можно сделать лишь в воображении. Все наши опыты должны быть проделаны на Земле, на которой мы вынуждены жить. Этот факт часто выражается на научном языке так: *нашей координатной системой является Земля.*

Чтобы яснее показать смысл этих слов, возьмем простой пример. Мы можем заранее сказать, где будет находиться брошенный с башни камень в любой момент времени, и мы можем проверить это предсказание наблюдением. Если рядом с башней помещен масштаб, мы можем предсказать, с какой отметкой на этом масштабе будет совпадать падающее тело в любой заданный момент времени.

Разумеется, башня и масштаб не должны быть сделаны из резины или какого-либо другого материала, который подвергался бы изменению в процессе опыта. В самом деле, неизменность масштаба, жестко связанного с Землей, и хорошие часы — это все, что нам принципиально нужно для опыта. Если мы их имеем, то мы можем не обращать внимания не только на архитектуру башни, но даже и на присутствие самой башни. Все предыдущие предположения тривиальны и обычно в описаниях таких экспериментов не отмечаются. Но этот анализ показывает, как много скрытых допущений имеется в любом из наших заявлений. В данном случае мы допустили существование твердого масштаба и идеальных часов, без которых невозможно было бы проконтролировать закон Галилея о падении тел. С помощью этих простых, но основных физических приборов — масштаба и часов — мы можем подтвердить указанный механический закон с определенной степенью точности. Если эксперимент выполнен тщательно, он обнаруживает несоответствие с теорией, обязанное вращению Земли или, иными словами, тому факту, что законы механики, как они здесь сформулированы, не строго справедливы в системе координат, жестко связанной с Землей.

Во всех механических экспериментах, независимо от их типа, мы должны определять положения материальных точек в некоторый определенный момент времени, так же как и в вышеуказанном опыте с падающим телом. Но положение всегда должно определяться по отношению к чему-то, подобно тому, как в предыдущем случае оно определялось по отношению к башне и масштабу. Чтобы определить положения тел, мы должны иметь то, что мы называем некоторым телом отсчета, или *системой отсчета*. Так, при определении положений предметов и людей в городе такую систему отсчета представляют улицы и проспекты. До сих пор мы не беспокоились о том, что надо определить систему отсчета, когда приводили законы механики, потому что мы живем на Земле и перед нами в любом частном случае не возникают трудности, когда мы выбираем систему отсчета, жестко связанную с Землей. Эта система отсчета, к которой мы относим все наши наблюдения, построенная из твердых неизменяемых тел, — свое-

образные механические леса, — называется *системой координат*.

До сих пор все наши физические утверждения имели некоторый недостаток. Мы не обращали внимания на тот факт, что все наблюдения должны производиться в определенной системе координат. Вместо описания структуры этой системы координат мы игнорировали ее существование. Например, когда мы писали: «тело движется равномерно...», мы должны были бы писать: «тело движется равномерно по отношению к выбранной системе координат...». Опыт с вращающейся комнатой научил нас, что результаты эксперимента могут зависеть от выбранной системы координат.

Если две системы координат вращаются относительно друг друга, то законы механики не могут быть справедливыми в обеих системах. Если поверхность воды в бассейне, образующем одну из этих систем координат, горизонтальна, то в другой, вращающейся системе поверхность воды такого же бассейна примет искривленную форму, подобную той, которую имеет поверхность кофе в стакане, когда его помешивают ложечкой.

Когда мы формулировали принципиальные законы механики, мы опустили один важный момент. Мы не установили, в какой системе координат они справедливы. Из-за этого вся классическая механика висит в воздухе, так как мы не знаем, к какой системе отсчета она отнесена. Однако пройдем на минуту мимо этой трудности. Мы сделаем несколько неточное предположение, что законы классической механики справедливы в каждой системе координат, жестко связанной с Землей. Это делается для того, чтобы фиксировать систему координат и сделать наши утверждения определенными. Хотя наше утверждение о том, что Земля является подходящей системой отсчета и не вполне верно, мы все же пока примем его.

Мы предполагаем, следовательно, что существует одна система координат, для которой справедливы законы механики. Является ли она единственной? Предположим, что мы имеем такие системы координат, как поезд, пароход или аэроплан, движущиеся относительно Земли. Будут ли законы механики справедливыми и для этих новых систем координат? Мы определенно знаем, что они не всегда

справедливы, например, в отношении поезда, идущего на повороте, или парохода, который качается во время бури, или самолета во время шторма. Начнем с простого примера. Пусть некоторая система координат движется прямолинейно и равномерно относительно нашей «хорошей» системы координат, т. е. относительно системы, в которой законы механики справедливы. Например, пусть это будет идеальный поезд или пароход, плывущий с изумительной плавностью и с неизменной скоростью вдоль прямой. Мы знаем из повседневного опыта, что обе системы будут «хорошими», т. е. физические опыты, произведенные в прямолинейно и равномерно движущемся поезде или пароходе, дадут те же результаты, что и на Земле. Но если поезд останавливается или резко ускоряется, или если море бурно, то происходят странные вещи. В поезде чемоданы выпадают из багажных сеток, на пароходе столы и стулья опрокидываются, а пассажиры страдают морской болезнью. С физической точки зрения — это просто означает, что законы механики не могут быть применимы к этим системам координат, что они являются «плохими» системами.

Этот результат может быть выражен с помощью так называемого *принципа относительности Галилея*:

*Если законы механики справедливы в одной системе координат, то они справедливы и в любой другой системе, движущейся прямолинейно и равномерно относительно первой.*

Если две системы координат движутся друг относительно друга неравномерно, то законы механики не могут быть справедливыми в обеих системах одновременно. «Хорошие» системы координат, т. е. те, в которых законы механики справедливы, мы называем *инерциальными системами*. Вопрос о том, существует ли вообще инерциальная система, еще не решен. Но если есть одна такая система, то их имеется бесконечное множество. Каждая система, движущаяся прямолинейно и равномерно относительно первоначальной, является тоже инерциальной системой.

Рассмотрим случай двух систем, отправляющихся из некоторого пункта и движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга с известной скоростью. Тот, кто предпочитает конкретные представления, может

думать о корабле или поезде, движущемся относительно Земли. Законы механики могут быть подтверждены экспериментально с одинаковой степенью точности как на Земле, так и на поезде или корабле, движущемся прямолинейно и равномерно. Некоторое затруднение возникает лишь тогда, когда наблюдатели в обеих системах начинают обсуждать результаты наблюдения одного и того же события с точки зрения своей собственной системы координат. Каждому хочется перевести наблюдения другого на свой собственный язык. Опять простой пример: одно и то же движение частицы наблюдается из двух систем координат — с Земли и из поезда, движущегося прямолинейно и равномерно. Обе системы инерциальны. Достаточно ли знать, что наблюдается в одной системе, для того, чтобы найти, что наблюдается в другой, если известны относительные скорости и положения обеих систем в некоторый момент времени? Как перейти от одной системы координат к другой. Это весьма существенно знать, так как обе системы эквивалентны и обе одинаково пригодны для описания событий в природе. В действительности совершенно достаточно знать результаты, полученные наблюдателем в одной системе, чтобы предсказать, какие результаты получит наблюдатель в другой.

Рассмотрим проблему более абстрактно, без парохода или поезда. Ради простоты будем исследовать только движение по прямым линиям. У нас имеются твердый стержень со шкалой и хорошие часы. Твердый стержень для простого случая прямолинейного движения представляет собой систему координат, совершенно так же, как ее представлял масштаб у башни в опыте Галилея. Всегда проще и лучше не обращать внимания на башни, стены, улицы и тому подобное, а мыслить систему координат в виде твердого стержня в случае прямолинейного движения, и твердого угольника из трех перпендикулярных стержней в случае произвольного движения в пространстве. Допустим, что мы имеем в простейшем случае две системы координат, т. е. два твердых стержня; положим один стержень на другой и назовем их соответственно «верхней» и «нижней» системой координат. Предположим, что обе системы координат движутся с определенной скоростью друг относительно друга, так что один стержень скользит вдоль

другого. Будет осторожнее предположить, что оба стержня бесконечны по длине и имеют начальные точки, но не имеют конечных. Для обеих систем достаточно иметь одни часы, так как течение времени в них одинаково. В начальный момент наблюдения начальные точки обоих стержней совпадают. Положение материальной точки в этот момент характеризуется в обеих системах одним и тем же числом. Положение материальной точки совпадает с некоторой точкой на шкале стержня; таким образом мы получаем число, определяющее положение этой материальной точки. Но если стержни движутся равномерно относительно

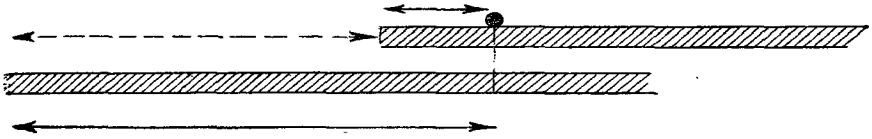


Рис. 53.

друг друга, то числа, определяющие положение точки на обоих стержнях, будут через некоторое время, скажем, через секунду, различны. Рассмотрим материальную точку, покоящуюся на верхнем стержне (рис. 53). Число, определяющее ее положение в верхней системе координат, не изменяется со временем. Но соответствующее число на нижнем стержне будет изменяться. Вместо слов: «число, определяющее положение точки» мы будем кратко говорить: «*координата точки*». Хотя следующее предложение звучит запутанно, тем не менее из рисунка мы видим, что оно правильно и выражает нечто очень простое. Координата точки в нижней системе координат равна ее координате в верхней системе координат плюс координата начала верхней системы относительно нижней. Весьма важно, что мы всегда можем подсчитать положение частицы в одной системе координат, если знаем ее положение в другой системе. Для этого мы должны знать относительное положение рассматриваемых координатных систем в любой момент времени. Хотя все это звучит по-ученому, на самом деле все это очень просто и едва ли заслуживает такого детального обсуждения, но это нам будет полезно впоследствии.

Необходимо отметить различие между определением положения точки и определением времени события. Каждый наблюдатель имеет свой собственный стержень, который образует его систему координат, но часы у всех одни и те же. Время есть нечто «абсолютное» и течет одинаково для всех наблюдателей во всех системах.

Теперь другой пример. Человек прогуливается по палубе большого корабля со скоростью трех километров в час. Это его скорость относительно корабля или, другими словами, скорость относительно системы координат,

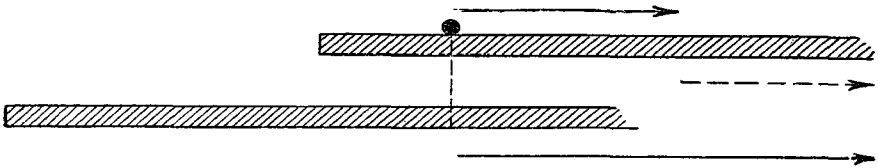


Рис. 54.

жестко связанной с кораблем. Если скорость корабля относительно берега тридцать километров в час и если прямолинейные и равномерные движения корабля и человека имеют одно и то же направление, то скорость прогуливающегося человека по отношению к наблюдателю на берегу будет равна тридцати трем километрам в час, а по отношению к кораблю — трем километрам в час. Мы можем формулировать этот факт в более общем виде: скорость движущейся материальной точки относительно нижней системы координат равна скорости относительно верхней системы плюс или минус скорость верхней системы относительно нижней в зависимости от того, имеют ли скорости одинаковые направления или противоположные (рис. 54). Мы всегда, следовательно, можем перевести от одной системы координат к другой не только координаты, но и скорости, если нам известны относительные скорости обеих систем. Положения, или координаты, и скорости являются примерами величин, которые различаются в различных системах координат и которые связаны друг с другом определенными, в данном случае простыми, законами преобразования.

Но существуют величины, которые одинаковы в обеих системах и которые не нуждаются ни в каких законах преобразований. Возьмем не одну, а две определенные точки на верхнем стержне и рассмотрим расстояние между ними. Это расстояние является разностью координат обеих точек. Чтобы найти положения двух точек относительно различных систем координат, мы должны использовать законы преобразований. Но при образовании разности двух координат то, что привносит другая система координат, покрывается и исчезает, как это ясно из рисунка 55.

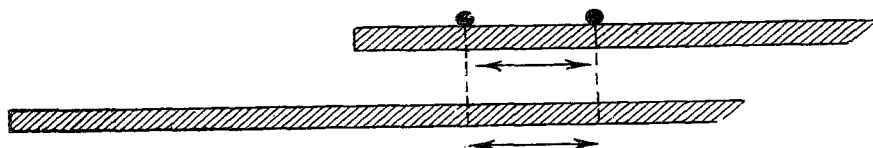


Рис. 55.

Мы должны прибавить, а затем вычесть расстояние между началами обеих систем. Поэтому расстояние между двумя точками *инвариантно*, т. е. не зависит от выбора систем координат.

Следующим примером величины, не зависящей от системы координат, является изменение скорости — понятие, хорошо известное нам из механики. Пусть опять материальная точка, движущаяся вдоль прямой, наблюдается в двух системах координат. Изменение ее скорости для наблюдателя в каждой системе представляет собой разность между двумя скоростями, а то, что привносится равномерным относительным движением обеих систем координат, уничтожается, когда подсчитывается разность. Следовательно, изменение скорости инвариантно, хотя, разумеется, лишь при условии, что относительное движение обеих систем координат равномерно. В противном случае изменение скорости было бы различно для каждой из обеих систем координат; это различие обуславливается изменением скорости относительного движения обоих стержней, представляющих наши координатные системы.

Наконец, последний пример! Пусть мы имеем две материальные точки, между которыми действует сила, зависящая только от расстояния. В случае прямолинейного



движения расстояние, а следовательно, так же и сила инвариантны. Поэтому закон Ньютона, связывающий силу с изменением скорости, будет справедлив в обеих системах координат. Еще раз мы получаем вывод, который подтверждается повседневным опытом: если законы механики справедливы в одной системе координат, то они справедливы и во всех системах, движущихся равномерно и прямолинейно относительно первой. Конечно, наш пример был очень простым. рассматривалось прямолинейное движение, для которого система координат могла быть представлена твердым стержнем. Но наши выводы справедливы вообще и они могут быть подытожены следующим образом.

1. Мы не знаем никакого правила для отыскания инерциальной системы. Однако, если задана одна инерциальная система, то мы можем найти бесконечное число их, так как все системы координат, движущиеся прямолинейно и равномерно относительно друг друга, являются инерциальными, если инерциальна одна из них.

2. Время, соответствующее событию, одинаково во всех системах координат. Но координаты и скорости различны и изменяются согласно закону преобразования.

3. Хотя координаты и скорости изменяются при переходе от одной системы координат к другой, сила и изменение скорости, а стало быть, и законы механики инвариантны относительно законов преобразования.

Законы преобразования, сформулированные нами выше для координат и скоростей, мы будем называть *законами преобразования классической механики*, или, короче, *классическими преобразованиями*.

## ЭФИР И ДВИЖЕНИЕ

Принцип относительности Галилея справедлив для механических явлений. Во всех инерциальных системах, движущихся относительно друг друга, применимы одни и те же законы механики. Справедлив ли этот принцип и для немеханических явлений, особенно тех, для которых понятия поля оказались столь важными? Все проблемы, которые сконцентрированы вокруг этого вопроса, сразу же приводят нас к исходной точке теории относительности.

Мы помним, что скорость света *в вакууме* или, другими словами, в эфире равна 300 000 километров в секунду и что свет — это электромагнитные волны, распространяющиеся в эфире. Электромагнитное поле несет энергию, которая, будучи излучена однажды из своего источника, ведет независимое существование. Пока мы будем по-прежнему считать, что эфир есть среда, в которой распространяются электромагнитные, а стало быть, и световые волны, хотя мы и знаем хорошо, как много трудностей связано с его механической структурой.

Представим себе, что мы сидим в закрытой комнате, настолько изолированной от внешнего мира, что воздух не может ни войти, ни удалиться из нее. Если мы тихо сидим и разговариваем, то мы, с физической точки зрения, создаем звуковые волны, которые распространяются в воздухе от их покоящегося источника со скоростью звука. Если бы между ртом и ухом не было воздуха или другой вещественной среды, то мы не могли бы обнаружить звук. Опыт показал, что скорость звука в воздухе одинакова во всех направлениях, если нет ветра, и воздух находится в покое относительно выбранной системы координат.

Вообразим теперь, что наша комната движется прямолинейно и равномерно в пространстве. Человек снаружи видит сквозь стеклянные стены движущейся комнаты (или поезда, если вы предпочитаете) все, что происходит внутри. Из измерений внутреннего наблюдателя он может найти скорость звука относительно его системы координат, связанной со средой, по отношению к которой движется комната. Здесь опять возникает старая, много раз обсуждавшаяся проблема определения скорости в одной системе координат, если она уже известна в другой системе.

Наблюдатель в комнате заявляет: скорость звука для меня одинакова во всех направлениях.

Внешний наблюдатель заявляет: скорость звука, распространяющегося в движущейся комнате, определенная в моей системе координат, не одинакова во всех направлениях. Она больше, чем установленная скорость звука, в направлении движения комнаты и меньше в противоположном направлении.

Эти заключения вытекают из классического преобразования и могут быть доказаны экспериментально. Комната увлекает находящуюся в ней материальную среду, воздух, в котором распространяются звуковые волны, и поэтому скорости звука будут различны для внешнего и внутреннего наблюдателя.

Рассматривая звук как волну, распространяющуюся в материальной среде, можно сделать некоторые дальнейшие выводы. Если мы не желаем слышать говорящего, мы можем поступить следующим, хотя и не наипростейшим путем, а именно: бежать со скоростью, большей, чем скорость звука относительно воздуха, который окружает оратора. Тогда произведенные звуковые волны никогда не будут в состоянии достичь наших ушей. С другой стороны, если мы пропустили важное слово, которое никогда не будет повторено, мы должны бежать со скоростью большей, чем скорость звука, чтобы настичь ушедшую волну и поймать давно произнесенное слово. Ни в одном из этих примеров нет ничего иррационального, за исключением того, что в обоих случаях мы должны будем бежать со скоростью около четырехсот метров в секунду, но мы вполне можем представить себе, что дальнейшее развитие техники сделает такие скорости возможными. Пуля, выпущенная из ружья, действительно движется со скоростью, большей, чем скорость звука, и человек, помещенный внутри такой пули, никогда не услышал бы звук выстрела.

Все эти примеры — чисто механического характера, и мы можем теперь сформулировать важнейшие вопросы: можно ли все только что сказанное о звуковой волне повторить применительно к световой волне? Можно ли принцип относительности Галилея и классические преобразования применить наряду с механическими также и к оптическим и электрическим явлениям? Было бы рискованно ответить на эти вопросы простым «да» или «нет», не вникая в их смысл более глубоко.

В случае звуковой волны в комнате, движущейся относительно внешнего наблюдателя прямолинейно и равномерно, очень существенны для наших выводов следующие обстоятельства.

Движущаяся комната увлекает воздух, в котором распространяются звуковые волны.

Скорости, наблюдаемые в обеих системах координат, движущихся друг относительно друга прямолинейно и равномерно, связаны классическим преобразованием.

Соответствующая проблема для света должна формулироваться несколько иначе. Наблюдатели в комнате больше не разговаривают, а посылают во всех направлениях световые сигналы или световые волны. Предположим, далее, что источники, излучающие световые сигналы, неизменно пребывают в комнате. Световые волны распространяются в эфире подобно тому, как звуковые распространяются в воздухе.

Увлекается ли эфир комнатой, как увлекался ранее воздух? Так как механической модели эфира у нас нет, ответить на этот вопрос чрезвычайно трудно. Если комната закрыта, то воздух внутри нее вынужден двигаться вместе с ней. Очевидно, нет никакого смысла те же рассуждения относить к эфиру, так как в него погружена вся материя и он проникает повсюду. Для эфира нет закрытых дверей. «Движущаяся комната» теперь означает лишь движущуюся систему координат, с которой жестко связан источник света. Однако мы вполне можем представить себе, что движение комнаты вместе со световым источником увлекает с собой эфир подобно тому, как увлекались в закрытой комнате звуковой источник и воздух. Но точно так же мы можем представить себе и обратное: комната продвигается сквозь эфир, как корабль продвигается по абсолютно гладкому морю, не увлекая какие-либо части среды, а продвигаясь сквозь нее. В первой нашей картине комната, двигаясь вместе со световым источником, увлекает эфир. В таком случае возможна аналогия со звуковой волной, и можно сделать совершенно такие же выводы. Во второй картине комната, двигаясь вместе со световым источником, не увлекает эфира. В этом случае аналогия со звуковой волной невозможна, и выводы, сделанные для звуковой волны, для световой волны не годятся. Это — две крайние возможности. Мы могли бы еще представить себе более сложную возможность, когда эфир лишь частично увлекается движением комнаты и источника света. Но нет никаких оснований обсуждать более сложные предположения, прежде чем не выяснено, какой из двух более простых крайних случаев подтверждает опыт.

Мы начнем с первой картины и соответственно этому временно предположим, что эфир увлекается движением комнаты и жестко связанного с ней источника света. Если мы уверены в справедливости принципа преобразования для скоростей звуковых волн, то теперь мы можем применить наши выводы также и к световым волнам. Нет никаких оснований сомневаться в простом механическом законе преобразования, который устанавливает лишь, что скорости в известных случаях должны складываться, а в других вычитаться. Поэтому сейчас мы допустим и увлечение эфира движением комнаты и светового источника, и классическое преобразование.

Если я включаю свет, источник которого жестко связан с моей комнатой, то скорость светового сигнала, как это экспериментально доказано, равна 300 000 километров в секунду. Но внешний наблюдатель заметит движение комнаты, а следовательно, и движение источника света, и так как эфир увлекается, он должен будет сделать вывод: скорость света во внешней системе координат различна в различных направлениях. Она больше, чем установленная скорость света, в направлении движения комнаты и меньше в противоположном направлении. Наш вывод таков: если эфир увлекается движением комнаты и источника света и если механические законы справедливы, то скорость света должна зависеть от скорости источника света. Свет, попадающий нам в глаза от движущегося источника, имел бы большую скорость, если бы источник приближался к нам, и меньшую, если бы он удалялся от нас.

Если бы мы обладали скоростью, большей, чем скорость света, то мы могли бы убежать от светового сигнала. Настигая световые волны, посланные прежде, мы могли бы видеть события прошлого. Мы поймали бы их в порядке, обратном тому, в котором они были посланы, и цепь событий на Земле казалась бы нам подобной фильму, который смотрят в обратном порядке, начиная со счастливого конца. Все эти выводы следуют из предположения, что движение системы координат увлекает эфир и что справедливы механические законы преобразования. Если это так, то между светом и звуком имеется полная аналогия.

Но нет никаких оснований утверждать, что эти выводы верны. Наоборот, они противоречат всем наблюдениям,

проделанным с целью их проверки. В истинности такого приговора нет ни малейшего сомнения, хотя он получается с помощью довольно окольных экспериментов вследствие больших технических трудностей, вызванных огромной скоростью света. *Скорость света всегда одинакова во всех системах координат, независимо от того, движется ли излучающий источник или нет, и независимо от того, как он движется.*

Мы не будем подробно обсуждать многих экспериментов, из которых может быть сделан этот важный вывод. Однако мы можем привести очень простые аргументы, которые если и не доказывают, что скорость света независима от движения источника, то тем не менее делают этот факт убедительным и понятным.

В нашей планетной системе Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца. Мы не знаем о существовании других планетных систем, подобных нашей. Однако существует очень много систем — так называемых двойных звезд, — состоящих из двух звезд, движущихся вокруг точки, называемой их центром тяжести. Наблюдение движения этих двойных звезд обнаруживает, что и для них справедлив закон тяготения Ньютона. Предположим теперь, что скорость света зависит от скорости излучающего тела. Тогда луч света, вышедший от звезды, будет распространяться быстрее или медленнее, соответственно тому, какова была скорость звезды в момент излучения света. В этом случае все движение казалось бы нам чрезвычайно запутанным, и было бы невозможно при отдаленности двойных звезд подтвердить справедливость того же самого закона тяготения, который управляет движениями нашей планетной системы.

Рассмотрим другой опыт, основанный на очень простой идее. Представим себе очень быстро вращающееся колесо. По нашему предположению, эфир увлекается движением и принимает в нем участие. Световая волна, проходя вблизи колеса, имела бы различные скорости, смотря по тому, находится ли колесо в покое или в движении. Скорость света в покоящемся эфире отличалась бы от скорости света в эфире, увлеченном движением колеса, так же как скорость звуковой волны изменяется в спокойные и ветреные дни. Но такое различие не наблюдается! Незави-

симо от того, какой решающий эксперимент мы придумаем, вывод всегда противоречит предположению, что эфир увлекается движением. Таким образом, результат наших исследований, поддержанный более детальными техническими аргументами, таков:

Скорость света не зависит от движения излучающего источника.

Нельзя считать, что движущееся тело увлекает окружающий эфир.

Поэтому мы должны отбросить аналогию между звуковыми и световыми волнами и вернуться ко второй возможности, а именно предположить, что материя движется сквозь эфир, который никакого участия в ее движении не принимает. Это означает, что мы предполагаем наличие эфирного моря, относительно которого все системы координат либо покоятся, либо движутся. Оставим пока вопрос о том, доказал или опроверг эксперимент эту теорию. Лучше познакомимся поближе со значением этого нового предположения и с выводами, которые можно из него сделать.

Если мы примем это предположение, то мы должны признать, что существует система координат, покоящаяся относительно эфирного моря. В механике нельзя было выделить ни одну из многих систем координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Все такие системы координат были в равной степени «хороши» или «плохи». Если мы имеем две системы координат, движущиеся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, то в механике бессмысленно спрашивать, какая из них движется, а какая покоится. Наблюдать можно только относительное прямолинейное и равномерное движение. Благодаря принципу относительности Галилея мы не можем говорить об абсолютном прямолинейном и равномерном движении. Что имеется в виду, когда утверждается, что существует абсолютное, а не только относительное прямолинейное и равномерное движение? Просто то, что существует одна система координат, в которой некоторые законы природы отличаются от законов во всех других системах. Стало быть, это означает, что каждый наблюдатель может обнаружить, находится ли его система в покое или в движении, путем сравнения законов, справедли-

ливых для его системы, с законами, справедливыми в одной-единственной системе, которая обладает абсолютной монополией и служит в качестве образца. Здесь положение дел отличается от утверждения классической механики, в которой абсолютное прямолинейное и равномерное движение совершенно бессмысленно вследствие принципа относительности Галилея.

Какие выводы можно было бы сделать в отношении явлений поля, если предположить движение сквозь эфир? Это означало бы, что существует одна система координат, отличная от всех других, покоящаяся относительно эфирного моря. Совершенно ясно, что некоторые законы природы должны отличаться в этой системе координат, иначе фраза «движение сквозь эфир» была бы бессмысленной. Если принцип относительности Галилея справедлив, то движение сквозь эфир вообще не имеет смысла. Примирить эти две идеи невозможно. Однако если существует одна особая система координат, связанная с эфиром, то имеет определенный смысл говорить об «абсолютном движении» или «абсолютном покое».

Фактически мы не имеем выбора. Мы пытались спасти принцип относительности Галилея, предполагая, что системы увлекают эфир в своем движении, но это привело к противоречию с опытом. Остается единственный выход — отказать от принципа относительности Галилея и испытать предположение о том, что все тела движутся сквозь спокойное эфирное море.

Следующий шаг состоит в рассмотрении некоторых выводов, противоречащих принципу относительности Галилея и говорящих в пользу движения сквозь эфир; затем эти выводы надо подвергнуть экспериментальной проверке. Такие эксперименты довольно легко вообразить, но очень трудно осуществить. Но так как мы интересуемся здесь только идеями, нам не придется заботиться о технических трудностях.

Вернемся опять к движущейся комнате с двумя наблюдателями: внутри и вне ее. Внешний наблюдатель будет представлять себе основную систему координат, связанную с эфирным морем. Это — особая система координат, в которой скорость света всегда одинакова по величине. Скорость распространения света, испускаемого любыми



источниками, всегда одинакова, независимо от того, движутся ли они или находятся в покое. Комната и наблюдатель движутся сквозь эфир. Представим себе, что свет в центре комнаты то вспыхивает, то гаснет, и, кроме того, вообразим, что стены комнаты прозрачны, так что скорость света могут измерить оба наблюдателя, и внешний, и внутренний. Если мы спросим обоих наблюдателей, какие результаты они ожидают получить, то их ответы, примерно, были бы таковы.

*Внешний наблюдатель.* Моя система координат связана с эфирным морем. Скорость света в моей системе постоянна. Мне не нужно обращать внимание на то, движутся ли источники света или другие тела или нет, потому что они никогда не увлекают с собой эфирного моря. Моя система координат отличается от всех других, и скорость света в этой системе должна быть постоянной, независимо от направления светового луча или движения его источника.

*Внутренний наблюдатель.* Моя комната движется сквозь эфирное море. Передняя стена комнаты удаляется от света, а задняя приближается к нему. Если бы комната двигалась по отношению к эфирному морю со скоростью света, то излученный из центра комнаты свет никогда не достиг бы стенки, убегающей от него. Если бы комната двигалась со скоростью, меньшей, чем скорость света, то волна, посланная из центра комнаты, достигла бы одной из стен раньше, чем другой. Стену, движущейся навстречу световой волне, последняя достигла бы раньше, чем стены, удаляющейся от нее. Потому, хотя источник света и жестко связан с моей системой координат, скорость света не будет одинаковой во всех направлениях. Скорость будет меньше в направлении движения относительно эфирного моря, так как стена убегает, и больше — в противоположном направлении, так как стена движется навстречу световой волне, как бы стремясь скорее ее встретить.

Таким образом, только в одной системе координат, связанной с эфирным морем, скорость света была бы одинаковой во всех направлениях. В другой системе, движущейся относительно эфирного моря, она зависела бы от направления, в котором производится измерение.

Только что рассмотренный решающий эксперимент позволяет нам проверить теорию, допускающую движение сквозь эфирное море. Природа, действительно, предоставила в наше распоряжение систему, движущуюся с достаточно большой скоростью — Землю, в ее годовом движении вокруг Солнца.

Если наше предположение правильно, то скорость света в направлении движения Земли отличалась бы от скорости света в противоположном направлении. Можно подсчитать получающиеся разности скоростей и придумать соответствующую экспериментальную проверку. Так как из теории следует, что здесь имеют место лишь небольшие разности времен, то необходимо придумать очень остроумную установку. Это было сделано в знаменитом опыте Майкельсона — Морли. Результатом его был смертный приговор теории покоящегося эфирного моря, сквозь который движется вся материя. Никакой зависимости скорости света от направления обнаружено не было. Но если исходить из теории эфирного моря, то не только скорость света, но и другие явления поля показали бы зависимость от направления в движущейся системе координат. Все опыты дали такой же отрицательный результат, как и опыт Майкельсона — Морли; никакой зависимости от направления движения Земли не было обнаружено.

Положение становилось все более серьезным. Были проверены два предположения. Первое, — что движущиеся тела увлекают эфир. Тот факт, что скорость света не зависит от движения источника, противоречит этому предположению. Второе, — что существует одна особая система координат и что движущиеся тела не увлекают эфир, а проходят сквозь постоянно покоящееся эфирное море. Если это так, то принцип относительности Галилея несправедлив, и скорость света не может быть одинаковой в любой системе координат. И снова мы находимся в противоречии с опытом.

Были придуманы и более искусственные теории, предполагающие, что действительная правда лежит где-то между двумя предельными случаями, а именно, теории, исходящие из того, что эфир увлекается движущимися телами только частично. Но все они оказались несостоятельными! Всякая попытка объяснить электромагнит-

ные явления в движущихся системах координат с помощью движения эфира, движения сквозь эфир, или с помощью обоих этих движений, оказывалась неудачной.

Так возникло одно из наиболее драматических положений в истории науки. Все предположения относительно поведения эфира ни к чему не приводили! Приговор эксперимента всегда был отрицательным. Оглядываясь на развитие физики, мы видим, что вскоре после своего рождения эфир стал «выродком» в семье физических субстанций. Во-первых, построение простой механической модели эфира оказалось невозможным и было отброшено. Этим в значительной степени был вызван крах механистической точки зрения. Во-вторых, мы должны были потерять надежду на то, что благодаря существованию эфирного моря будет выделена одна система координат, что позволило бы нам опознать не только относительное, но и абсолютное движение. Это было бы единственным, если не считать переноса волн, способом наблюдения и подтверждения существования эфира. Все наши попытки сделать эфир реальным провалились. Он не обнаружил ни своего механического строения, ни абсолютного движения. От всех свойств эфира не осталось ничего, кроме того свойства, из-за которого его и придумали, а именно, кроме способности передавать электромагнитные волны. Все попытки открыть свойства эфира привели к трудностям и противоречиям. После стольких неудач наступает момент, когда следует совершенно забыть об эфире и постараться никогда больше не упоминать о нем. Мы будем говорить: наше пространство обладает физическим свойством передавать волны и тем самым совсем избежим употребления слова, от которого решили отказаться.

Однако выбрасывание слова из нашего словаря не является, конечно, исцеляющим средством. Наши бедствия в самом деле слишком глубоки, чтобы их можно было разрешить таким путем!

Соберем теперь вместе те факты, которые достаточно проверены опытом, не заботясь больше о проблеме эфира.

1. Скорость света в пустом пространстве всегда постоянна, независимо от движения источника или приемника света.

2. В двух системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, все законы природы строго одинаковы, и нет никакого средства обнаружить абсолютное прямолинейное и равномерное движение.

Существует много экспериментов, подтверждающих оба эти положения, и нет ни одного, который бы противоречил какому-либо из них. Первое положение выражает постоянство скорости света, второе обобщает принцип относительности Галилея, сформулированный для механических явлений, на все происходящее в природе.

В механике мы видели, что если скорость материальной точки относительно одной системы координат такая-то, то она будет иной в другой системе, движущейся прямолинейно и равномерно относительно первой. Это вытекает из простых принципов механического преобразования. Они непосредственно даны нашей интуицией (человек, движущийся относительно корабля и берега), и, очевидно, здесь нет никакой ошибки! Но этот закон преобразования находится в противоречии с постоянством скорости света. Другими словами, мы прибавляем третий принцип.

3. Координаты и скорости преобразовываются от одной инерциальной системы к другой согласно классическому преобразованию.

Противоречие очевидно. Мы не можем объединить три указанных выше принципа.

Классическое преобразование кажется слишком очевидным и простым, чтобы попытаться изменить его. Мы уже пытались изменить первые два принципа и пришли к несогласию с экспериментом. Все теории движения эфира требовали изменения первых двух принципов. Но это не приносило никакой пользы. Еще раз мы убеждаемся в серьезности наших трудностей. Необходим новый путь. Это путь *признания первого и второго положения исходными* и, хотя это и кажется странным, — *отказа от третьего положения*. Новый путь начинается с анализа наиболее фундаментальных и простых понятий. Мы покажем, как этот анализ вынуждает нас изменить наши старые взгляды и устраняет все наши трудности.

## ВРЕМЯ, ПРОСТРАНСТВО, ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Наши новые положения суть:

1. *Скорость света в вакууме одинакова во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.*

2. *Законы природы одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.*

*Теория относительности* начинается с этих двух положений. С этого времени мы не будем применять классического преобразования, так как знаем, что оно противоречит исходным положениям.

В данном случае, как и всегда в науке, важно отказаться от глубоко укоренившихся, часто некритически повторяемых предрассудков. Так как мы видели, что изменения обоих положений приводят к противоречию с экспериментом, то мы должны иметь смелость твердо установить их справедливость и напасть на один возможно слабый пункт, а именно на способ, которым координаты и скорости преобразуются от одной системы координат к другой. Мы хотим сделать выводы из этих двух положений, посмотреть, где и как эти положения противоречат классическому преобразованию, и найти физический смысл полученных результатов.

Можно еще раз использовать пример с движущейся комнатой и наблюдателями внутри и вне ее. Пусть световой сигнал опять излучается из центра комнаты, и вновь мы спрашиваем обоих людей, что они обнаружат, допустив только два вышеуказанных принципа и забыв то, что было предварительно сказано о среде, сквозь которую проходит свет. Приведем их ответ:

*Внутренний наблюдатель.* Световой сигнал, идущий от центра комнаты, достигнет стен *одновременно*, так как все стены одинаково отстоят от источника света, а скорость света одинакова во всех направлениях.

*Внешний наблюдатель.* В моей системе координат скорость света совершенно такая же, как и в системе наблюдателя, движущегося вместе с комнатой. Мне нет дела до того, движется ли источник света в моей системе или нет, так как его движение не влияет на скорость света. То, что

я вижу, это — световой сигнал, идущий с постоянной скоростью, одинаковой во всех направлениях. Одна из стен стремится убежать от светового сигнала, а другая — приблизиться к нему. Поэтому убегающая стена будет достигнута световым сигналом немного позднее, чем приближающаяся. Хотя эта разность времен прибытия светового сигнала будет очень незначительной, если скорость комнаты мала сравнительно со скоростью света, тем не менее световой сигнал не достигнет обеих противоположных стен, расположенных перпендикулярно к направлению движения, совершенно одновременно.

Сравнивая предсказания обоих наблюдателей, мы обнаруживаем крайне изумительный результат, который явно противоречит несомненно хорошо обоснованным понятиям классической физики. Оба события — достижение стен двумя световыми лучами — одновременны для наблюдателя внутри и неодновременны для наблюдателя вне комнаты. В классической физике у нас были одни часы, одно течение времени для всех наблюдателей во всех системах. Время, а стало быть, и такие слова, как «одновременно», «ранее», «позднее», имели абсолютное значение, не зависящее от какой-либо системы. Два события, происходящие в одно и то же время в одной системе координат, необходимо происходили одновременно во всех системах координат.

Положения, указанные выше, т. е. теория относительности, вынуждают нас отказаться от этого взгляда. Мы описали два события, которые происходят одновременно в одной системе координат, но в разное время в другой системе. Наша задача — понять это следствие, понять смысл предложения: «Два события, одновременные в одной системе координат, не могут быть одновременны в другой системе».

Что мы обозначаем словами: «два одновременных события в одной системе координат»? Интуитивно каждый человек считает, что он понимает смысл этого предложения. Но будем осторожными и постараемся дать строгие определения, так как мы знаем, как опасно переоценивать интуицию. Ответим сначала на простой вопрос.

Что такое часы?

Примитивное субъективное чувство течения времени позволяет нам упорядочить наши впечатления, судить о

том, что одно событие происходит раньше, другое позднее. Но чтобы показать, что промежуток времени между двумя событиями равен десяти секундам, нужны часы. Благодаря применению часов понятие времени становится объективным. В качестве часов может быть использовано любое физическое явление, если только оно может быть повторено столько раз, сколько необходимо. Если мы возьмем интервал между началом и концом такого события за единицу времени, то любые интервалы времени мы можем измерить повторением этого физического процесса. Все часы, от простых песочных до наиболее совершенных, основаны на этой идее. При пользовании песочными часами единицей времени будет являться интервал, в течение которого песок высыпается из верхнего стаканчика в нижний. Тот же физический процесс может быть повторен перевертыванием стакана.

Пусть в двух отдаленных друг от друга точках пространства находится двое идеально идущих часов, точно показывающих одинаковое время. Это положение будет справедливым, несмотря на ту осторожность, с которой мы его проверяем. Но что это в действительности означает? Как можем мы удостовериться, что отдаленные друг от друга часы всегда показывают одинаковое время? Можно использовать один из возможных методов — телевидение. Легко понять, что телевидение берется как пример, само по себе оно не существенно для наших доводов. Я мог бы стоять около одних часов и смотреть на изображение других часов на экране телевизора. Тогда я мог бы судить, показывают ли часы одновременно одинаковое время или нет. Но это не было бы хорошим доказательством. Изображение в телевизоре передается электромагнитными волнами, следовательно, распространяется со скоростью света. На экране телевизора я вижу изображение, посланное некоторое очень короткое время тому назад, в то время как на часах, стоящих возле меня, я вижу то, что имеет место в настоящий момент. Эту трудность можно легко преодолеть. Для этого нужно рассмотреть изображения обоих часов в точке, одинаково отстоящей от каждой из них, т. е. рассмотреть их в точке, лежащей на середине расстояния между часами. Тогда, если сигналы посланы одновременно, они достигнут меня в один и тот же момент.

Если двое хороших часов, наблюдаемых в точке, находящейся посередине между ними, показывают одинаковое время, то они вполне подходят для указания времени событий в двух отдаленных точках.

В механике мы употребляли только одни часы. Но это было не очень удобно, потому что мы должны были производить все измерения вблизи этих часов. Смотря на удаленные от нас часы, например, с помощью телевизора, мы всегда должны помнить следующее: то, что мы видим теперь, в действительности произошло раньше, подобно тому, как, рассматривая заход Солнца, мы отмечаем это событие спустя восемь минут после того, как оно имело место. Во все показания часов мы должны вносить поправки, соответствующие нашему расстоянию от часов.

Поэтому неудобно иметь только одни часы. Однако теперь, поскольку мы знаем, как проверить, показывают ли двое, или вообще несколько часов одновременно одно и то же время, и идя тем же самым путем, мы легко можем вообразить себе в данной системе координат столько часов, сколько нам хочется.

Каждые из них помогут нам определить время событий, происходящих в непосредственном соседстве с ними. Все часы находятся в покое относительно системы координат. Они являются «хорошими» часами; они *синхронизированы*, что означает, что часы одновременно показывают одинаковое время.

В нашей расстановке часов нет ничего удивительного или странного. Вместо одних-единственных часов мы применяем теперь много синхронизированных часов и поэтому можем легко проверить, одновременны ли два отдаленных события в данной системе координат или нет. Они одновременны, если синхронизированные часы вблизи них показывают одинаковое время в момент, когда происходят события. Теперь утверждение, что одно отдаленное событие происходит раньше другого, имеет определенный смысл. Его можно проверить с помощью синхронизированных часов, покоящихся в нашей системе координат.

Все это находится в согласии с классической физикой и не вызывает еще противоречий с классическим преобразованием.



Для определения одновременности событий часы синхронизируются с помощью сигналов. В наших рассуждениях существенно то, что сигналы передаются со скоростью света, со скоростью, которая играет такую фундаментальную роль в теории относительности.

Так как мы хотим заняться важной проблемой о двух системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно относительно друг друга, то мы должны рассмотреть два стержня, снабженных часами. В каждой из обеих систем, движущихся друг относительно друга, наблюдатель имеет теперь свой собственный масштаб со своим собственным набором часов, жестко связанным с масштабом.

При измерениях в классической механике мы употребляли одни часы во всех системах координат. Теперь мы имеем много часов в каждой системе координат. Это различие несущественно. Одни часы были достаточны, но никто не может возражать против употребления многих часов, пока они ведут себя как хорошо синхронизированные часы.

Теперь мы приближаемся к существенному пункту, показывающему, где классическое преобразование противоречит теории относительности. Что происходит, когда двое часов движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга? Физик, держащийся классических взглядов, ответил бы: ничего; их ритм остается одинаковым, и мы можем употреблять для показания времени движущиеся часы так же, как и покоящиеся. Таким образом, согласно классической физике два события, одновременные в одной системе координат, будут одновременными в любой другой системе.

Но это не единственный возможный ответ. Мы можем столь же легко представить себе движущиеся часы, имеющие ритм, отличный от ритма покоящихся часов. Обсудим теперь эту возможность, не решая пока вопроса о том, изменяют ли на самом деле часы свой ритм при движении или нет. Что означает утверждение, что движущиеся часы изменяют свой ритм? Предположим ради простоты, что в верхней системе координат у нас только одни часы, а в нижней — много. У всех часов одинаковый механизм и нижние часы синхронизированы, т. е. они показывают

одновременно одинаковое время. Мы показали (рис. 56) три последовательных положения обеих систем, движущихся друг относительно друга. На первом рисунке положения стрелок верхних и нижних часов ради удобства

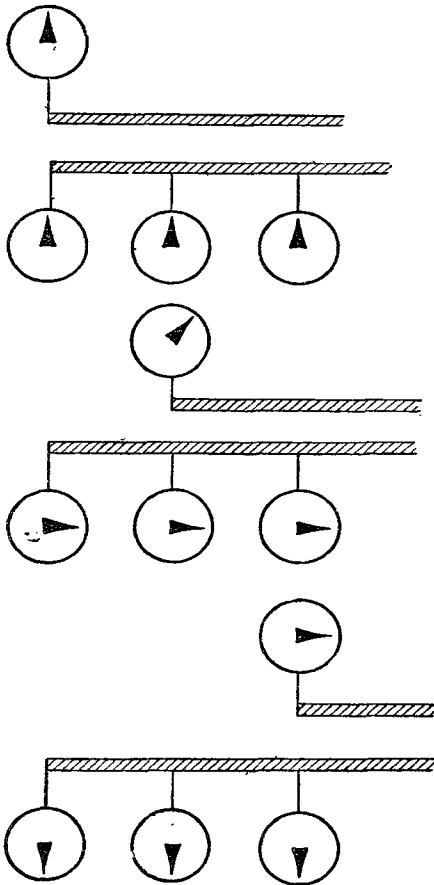


Рис. 56.

взяты одинаковыми; так мы их поставили сами. Все часы показывают одинаковое время. На втором рисунке мы видим относительные положения обеих систем спустя некоторое время. Все часы в нижней системе показывают одинаковое время, но часы в верхней системе вышли из общего ритма. Их ритм изменился, и время отличается вследствие того, что часы движутся относительно нижней системы. На третьем рисунке мы видим, что различие в положении стрелок со временем увеличилось. Наблюдатель, покоящийся в нижней системе координат, нашел бы, что движущиеся часы изменили свой ритм. Конечно, тот же результат получился бы, если бы часы двигались по отношению к наблюдателю, покоящемуся в верхней системе координат; в этом случае в верхней системе должно

было бы быть много часов, а в нижней только одни. Закон природы должен быть одинаков в обеих системах, движущихся друг относительно друга.

В классической механике молчаливо предполагалось, что движущиеся часы не изменяют своего ритма. Это

казалось столь очевидным, что едва ли было достойно упоминания. Но ничто не должно считаться слишком очевидным; если мы действительно желаем быть осторожными, мы должны подвергать анализу все положения, принимаемые в физике.

Нельзя считать какое-либо положение бессмысленным только потому, что оно отличается от положения классической физики. Мы можем легко представить себе, что движущиеся часы изменяют свой ритм, если закон этого изменения одинаков для всех инерциальных систем.

Еще один пример. Возьмем метровый стержень; это значит, что длина стержня — один метр, пока он находится в покоящейся системе координат. Пусть он движется прямолинейно и равномерно, скользя вдоль масштаба, представляющего систему координат. Будет ли его длина и в этом случае равна одному метру? Мы должны знать заранее, как определять его длину. Пока стержень был в покое, его концы совпадали с нанесенными на масштабе отметками, расстояние между которыми равнялось одному метру. Из этого мы заключили: длина покоящегося стержня равна одному метру. Как мы измеряем длину этого стержня во время движения? Это можно было бы сделать следующим образом. В данный момент два наблюдателя делают одновременно моментальные фотоснимки начала движущегося стержня и его конца. Поскольку снимки берутся одновременные, мы можем сравнить, с какими отметками масштаба совпадают начало и конец движущегося стержня. Таким путем мы определим его длину. Нужно, чтобы два наблюдателя отметили одновременные события, происходящие в различных частях данной системы. Нет никаких оснований считать, что результат таких измерений будет таким же, как и в случае, когда отрезок покоится. Поскольку фотографии должны быть сделаны одновременно, а одновременность, как мы знаем, является относительным понятием, зависящим от системы координат, то кажется вполне возможным, что результаты этих измерений будут различными в различных системах, движущихся друг относительно друга.

Мы легко можем представить себе, что не только движущиеся часы изменяют свой ритм, но и движущийся стержень тоже изменяет свою длину, если законы

изменений одинаковы для всех инерциальных систем координат.

Мы лишь обсуждали некоторые новые возможности, не приводя каких-либо оправданий в пользу их принятия.

Мы помним: скорость света одинакова во всех инерциальных системах координат. Этот факт несовместим с классическим преобразованием. Круг должен быть где-то разорван. Нельзя ли это сделать как раз здесь? Не можем ли мы предположить, что имеют место такие изменения в ритме движущихся часов и в длине движущегося стержня, что постоянство скорости света будет следовать непосредственно из этих предположений? В самом деле, можем! Здесь впервые теория относительности и классическая физика радикально расходятся. Наш довод может быть сформулирован иначе: если скорость света одинакова во всех системах, то движущиеся стержни должны изменять свою длину, движущиеся часы должны изменять свой ритм, а законы, управляющие этими изменениями, являются строго определенными.

Во всем этом нет ничего таинственного или неразумного. В классической физике всегда предполагалось, что часы и в движении, и в покое имеют одинаковый ритм, что масштабы и в движении, и в покое имеют одинаковую длину. Если скорость света одинакова во всех системах координат, если теория относительности справедлива, то мы должны пожертвовать этим положением. Трудно отделаться от глубоко укоренившихся предрассудков, но другого пути нет. С точки зрения теории относительности старые понятия кажутся произвольными. Почему надо верить, как это мы делали раньше, в абсолютное время, текущее одинаково для всех наблюдателей во всех системах? Почему надо верить в неизменяемое расстояние? Время определяется часами, пространственные координаты — масштабами, и результат этих определений может зависеть от поведения этих часов и масштабов, когда они находятся в движении. Нет оснований считать, что они будут вести себя так, как нам этого хотелось бы. Косвенное наблюдение, а именно, наблюдение явлений электромагнитного поля показывает, что движущиеся часы изменяют свой ритм, а масштаб — длину, в то время как, основываясь на механических явлениях, мы не думали, чтобы это имело место. Мы

должны принять понятие относительного времени в каждой системе координат, ибо это наилучший выход из трудностей. Дальнейший научный успех, достигнутый теорией относительности, показывает, что новый взгляд не должен рассматриваться как печальная необходимость, ибо успехи теории относительности оказались весьма значительными.

До сих пор мы старались показать, что привело к основным положениям теории относительности и как теория относительности вынуждала нас пересматривать и изменять классическое преобразование, по-новому трактуя понятия времени и пространства. Наша цель — указать идеи, образующие основу новых физических и философских взглядов. Эти идеи просты; но в той форме, в которой они здесь сформулированы, они недостаточны для того, чтобы получить выводы не только качественные, но и количественные. Мы опять должны применить наш старый метод объяснения только принципиальных идей и формулировки некоторых выводов без доказательства.

Чтобы сделать ясным различие между взглядом старого физика (назовем его С), верящего в классическое преобразование, и взглядом нового физика (назовем его Н), признающего теорию относительности, вообразим между ними следующий диалог.

С. Я верю в принцип относительности Галилея в механике, ибо я знаю, что законы механики одинаковы в двух системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, или, другими словами, что эти законы инвариантны относительно классического преобразования.

Н. Но принцип относительности следует применять ко всем событиям внешнего мира. Не только законы механики, но и все законы природы должны быть одинаковы в системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

С. Но как все законы природы могут оказаться одинаковыми в системах, движущихся друг относительно друга? Ведь уравнения поля, т. е. уравнения Максвелла, неинвариантны относительно классического преобразования. Это ясно обнаруживается на примере скорости света. Согласно классическому преобразованию эта скорость

не была бы одинаковой в двух системах, движущихся друг относительно друга.

Н. Это только показывает, что классическое преобразование нельзя применять, что связь между двумя системами координат должна быть иной, и что мы не можем связывать координаты и скорости в разных системах координат так, как это сделано в этих законах преобразования. Мы должны заменить их новыми законами, выведя последние из основных положений теории относительности. Не будем заботиться о математическом выражении этих новых законов преобразования и удовлетворимся тем, что они отличны от классического. Мы назовем их кратко *преобразованиями Лоренца*. Можно показать, что уравнения Максвелла, т. е. законы поля, инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца, подобно тому, как законы механики инвариантны по отношению к классическим преобразованиям. Вспомним, как обстояло дело в классической физике. Мы имели законы преобразования для координат, законы преобразования для скоростей, но законы механики были одинаковы для обеих систем координат, движущихся прямолинейно и равномерно относительно друг друга. У нас были законы преобразования для пространства, но не для времени, потому что время было одинаково во всех системах координат. Однако, здесь, в теории относительности, оно различно. Здесь мы имеем законы преобразования пространства, времени и скоростей, отличающиеся от классических законов. Но законы природы опять должны быть одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Законы природы должны быть инвариантны, но не по отношению к классическим преобразованиям, как прежде, а по отношению к новому типу преобразований — так называемым преобразованиям Лоренца. Во всех инерциальных системах справедливы те же самые законы, а переход от одной системы к другой дается преобразованиями Лоренца.

С. Я верю вам, но мне интересно было бы знать различие между преобразованиями классическими и преобразованиями Лоренца.

Н. Ответить на ваш вопрос лучше всего следующим образом. Сошлемся на некоторые характерные черты клас-

сических преобразований, и я постараюсь объяснить, сохраняются ли они в преобразованиях Лоренца, и если нет, то как они изменяются.

С. Если что-либо происходит в какой-то точке пространства в некоторый момент времени в моей системе координат, то наблюдатель, находящийся в другой системе координат, движущейся прямолинейно и равномерно относительно моей, отмечает другое число, определяющее положение места, где происходит событие, но, конечно, то же самое время. Мы употребляем одни и те же часы во всех системах, независимо от того, движутся ли они или нет. Это и с вашей точки зрения справедливо?

Н. О, нет. Каждая система координат должна быть снабжена собственными часами, покоящимися в ней, так как движение изменяет ритм часов. Два наблюдателя, находящиеся в различных системах координат, отмечают не только различные числа, определяющие положение, но и различные числа, определяющие время, в которое происходит это событие.

С. Это означает, что время не является больше инвариантом. В классических преобразованиях время всегда одно и то же во всех системах. В преобразованиях Лоренца оно изменяется и ведет себя аналогично координате в старых преобразованиях. Интересно знать, как обстоит дело с длиной. Согласно классической механике твердый стержень сохраняет свою длину как в движении, так и в покое. Верно ли это теперь?

Н. Неверно. В самом деле, из преобразований Лоренца следует, что движущийся стержень сокращается в направлении движения, и сокращение тем больше, чем больше скорость. Чем быстрее движется стержень, тем короче он оказывается. Но такое сокращение происходит только в направлении движения. На рисунке 57 вы видите стержень, который сокращается до половины своей первоначальной длины, когда он движется со скоростью, приближающейся к 0,9 скорости света. Однако в направлении, перпендикулярном к движению, сокращения нет, что я и постарался проиллюстрировать на рисунке 58.

С. Это означает, что ритм движущихся часов и длина движущихся стержней зависит от скорости. Но каким образом?

Н. Изменение становится более заметным по мере возрастания скорости. Из преобразований Лоренца следует,



Рис. 57

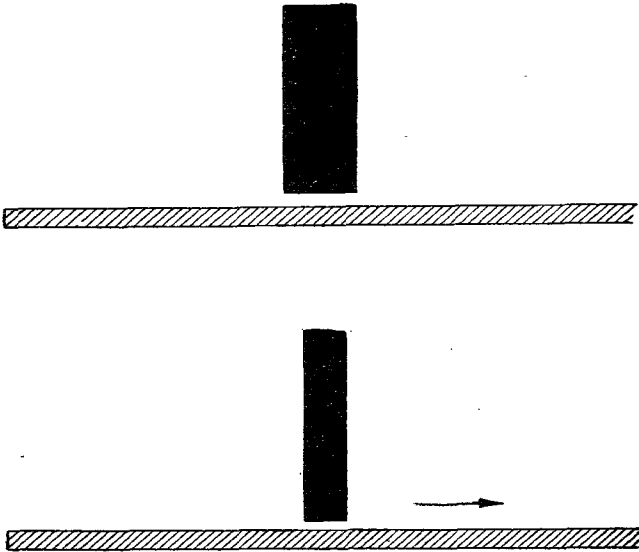


Рис. 58.

что стержень сократится до нуля, если его скорость достигнет скорости света. Аналогично этому ритм движущихся часов замедляется сравнительно с часами, мимо которых они проходят вдоль стержня; часы совершенно остановились бы, если бы они могли двигаться со скоростью света.



С. Это кажется противоречащим всему нашему опыту. Мы знаем, что вагон не становится короче, когда он в движении, и мы знаем также, что машинист всегда может сравнить свои «хорошие» часы с часами, мимо которых он проезжает, находя, что они хорошо согласованы друг с другом, вопреки вашему утверждению.

Н. Это, конечно, верно. Но все скорости в механике очень малы сравнительно со скоростью света, поэтому нелепо применять теорию относительности к этим явлениям. Каждый машинист может спокойно применять классическую физику, даже если он увеличит свою скорость в сотни тысяч раз. Мы могли бы ожидать несогласия между экспериментом и классическими преобразованиями только в случае скоростей, приближающихся к скорости света. Справедливость преобразований Лоренца может быть проверена лишь при очень больших скоростях.

С. Но имеется и другая трудность. Согласно механике я могу вообразить тела, обладающие скоростями, даже большими, чем скорость света. Тело, движущееся со скоростью света относительно плывущего корабля, движется со скоростью, большей, чем скорость света, относительно берега. Что произойдет со стержнем, который сократился до нуля, когда его скорость сравнялась со скоростью света? Едва ли мы можем ожидать отрицательной длины, если скорость стержня больше скорости света.

Н. В действительности нет никакого основания для такой иронии! С точки зрения теории относительности материальные тела не могут иметь скорости, большей, чем скорость света. Скорость света образует верхний предел скоростей для всех материальных тел. Если скорость тела относительно корабля равна скорости света, то и относительно берега она тоже будет равна скорости света. Простой механический закон сложения и вычитания скоростей больше несправедлив или, более точно, справедлив лишь приближенно для малых скоростей, но не для скоростей, близких к скорости света. Число, выражающее скорость света, явно входит в преобразования Лоренца и играет роль предельного случая, подобно бесконечной скорости в классической механике. Эта более общая теория не противоречит классическим преобразованиям и классической механике. Наоборот, к старым понятиям мы возвращаемся, как к

предельному случаю, когда скорости малы. С точки зрения новой теории ясно, в каких случаях справедлива классическая физика и где лежат ее пределы. Было бы нелепо применять теорию относительности к движению автомобилей, пароходов и поездов, как нелепо употреблять счетную машину там, где вполне достаточна таблица умножения.

### ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И МЕХАНИКА

Теория относительности необходимо возникает из серьезных и глубоких противоречий в старой теории, из которых, казалось, не было выхода. Сила новой теории заключается в согласованности и простоте, с которой она разрешает все эти трудности, используя лишь немногие очень убедительные предположения.

Хотя теория возникла из проблемы поля, она должна охватить все физические законы. Трудность, по-видимому, появляется здесь. Законы поля, с одной стороны, и законы механики, с другой, имеют совершенно различный характер. Уравнения электромагнитного поля инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца, а уравнения механики инвариантны по отношению к классическим преобразованиям. Но теория относительности требует, чтобы все законы природы были инвариантны по отношению к лоренцевым, а не классическим преобразованиям. Последние являются лишь специальным, предельным случаем преобразований Лоренца, когда относительные скорости обеих систем координат очень малы. Если это так, то классическую механику следует изменить, чтобы согласовать ее с требованием инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца. Или, другими словами, классическая механика не может быть справедливой, если скорости приближаются к скорости света. Переход от одной системы координат к другой может осуществляться только единственным путем — через преобразования Лоренца.

Классическую механику нетрудно было изменить так, чтобы она не противоречила ни теории относительности, ни изобилию материала, полученного наблюдением и объясненного классической механикой. Старая механика справедлива для малых скоростей и образует предельный случай новой механики.

Интересно рассмотреть какой-либо пример изменения в классической механике, которое вносит теория относительности. Возможно, это приведет нас к некоторым выводам, которые могут быть подтверждены или опровергнуты экспериментом.

Предположим, что тело, имеющее определенную массу, движется вдоль прямой и подвергается воздействию внешней силы, действующей в направлении движения. Сила, как мы знаем, пропорциональна изменению скорости. Или, чтобы сказать яснее: не имеет значения, увеличивает ли данное тело свою скорость за одну секунду со 100 до 101 метра в секунду, или от 100 километров до 100 километров и одного метра в секунду, или от 300 000 километров до 300 000 километров и одного метра в секунду. Сила, необходимая для сообщения данному телу какого-либо определенного изменения скорости, всегда одна и та же.

Верно ли это положение с точки зрения теории относительности? никоим образом! Этот закон справедлив только для малых скоростей. Каков же, по теории относительности, закон для больших скоростей, приближающихся к скорости света? Если скорость велика, то необходима чрезвычайно большая сила, чтобы увеличить ее. Вовсе не одно и то же — увеличить ли на один метр в секунду скорость, равную примерно 100 метрам в секунду, или же скорость, приближающуюся к световой. Чем ближе скорость к скорости света, тем труднее ее увеличить. Когда скорость равна скорости света, то уже невозможно увеличить ее дальше. Таким образом, то новое, что вносит теория относительности, не является удивительным. Скорость света есть верхний предел для всех скоростей. Никакая конечная сила, как бы велика она ни была, не может вызвать увеличения скорости сверх этого предела. На место старого закона механики, связывающего силу и изменение скорости, появляется более сложный закон. С нашей новой точки зрения классическая механика проста потому, что почти во всех наблюдениях мы имеем дело со скоростями, значительно меньшими, чем скорость света.

Покоящееся тело имеет определенную массу, так называемую *массу покоя*. Мы знаем из механики, что всякое тело сопротивляется изменению его движения; чем больше

предельному случаю, когда скорости малы. С точки зрения новой теории ясно, в каких случаях справедлива классическая физика и где лежат ее пределы. Было бы нелепо применять теорию относительности к движению автомобилей, пароходов и поездов, как нелепо употреблять счетную машину там, где вполне достаточна таблица умножения.

### ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И МЕХАНИКА

Теория относительности необходимо возникает из серьезных и глубоких противоречий в старой теории, из которых, казалось, не было выхода. Сила новой теории заключается в согласованности и простоте, с которой она разрешает все эти трудности, используя лишь немногие очень убедительные предположения.

Хотя теория возникла из проблемы поля, она должна охватить все физические законы. Трудность, по-видимому, появляется здесь. Законы поля, с одной стороны, и законы механики, с другой, имеют совершенно различный характер. Уравнения электромагнитного поля инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца, а уравнения механики инвариантны по отношению к классическим преобразованиям. Но теория относительности требует, чтобы все законы природы были инвариантны по отношению к лоренцевым, а не классическим преобразованиям. Последние являются лишь специальным, предельным случаем преобразований Лоренца, когда относительные скорости обеих систем координат очень малы. Если это так, то классическую механику следует изменить, чтобы согласовать ее с требованием инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца. Или, другими словами, классическая механика не может быть справедливой, если скорости приближаются к скорости света. Переход от одной системы координат к другой может осуществляться только единственным путем — через преобразования Лоренца.

Классическую механику нетрудно было изменить так, чтобы она не противоречила ни теории относительности, ни изобилию материала, полученного наблюдением и объясненного классической механикой. Старая механика справедлива для малых скоростей и образует предельный случай новой механики.

Интересно рассмотреть какой-либо пример изменения в классической механике, которое вносит теория относительности. Возможно, это приведет нас к некоторым выводам, которые могут быть подтверждены или опровергнуты экспериментом.

Предположим, что тело, имеющее определенную массу, движется вдоль прямой и подвергается воздействию внешней силы, действующей в направлении движения. Сила, как мы знаем, пропорциональна изменению скорости. Или, чтобы сказать яснее: не имеет значения, увеличивает ли данное тело свою скорость за одну секунду со 100 до 101 метра в секунду, или от 100 километров до 100 километров и одного метра в секунду, или от 300 000 километров до 300 000 километров и одного метра в секунду. Сила, необходимая для сообщения данному телу какого-либо определенного изменения скорости, всегда одна и та же.

Верно ли это положение с точки зрения теории относительности? Никоим образом! Этот закон справедлив только для малых скоростей. Каков же, по теории относительности, закон для больших скоростей, приближающихся к скорости света? Если скорость велика, то необходима чрезвычайно большая сила, чтобы увеличить ее. Вовсе не одно и то же — увеличить ли на один метр в секунду скорость, равную примерно 100 метрам в секунду, или же скорость, приближающуюся к световой. Чем ближе скорость к скорости света, тем труднее ее увеличить. Когда скорость равна скорости света, то уже невозможно увеличить ее дальше. Таким образом, то новое, что вносит теория относительности, не является удивительным. Скорость света есть верхний предел для всех скоростей. Никакая конечная сила, как бы велика она ни была, не может вызвать увеличения скорости сверх этого предела. На место старого закона механики, связывающего силу и изменение скорости, появляется более сложный закон. С нашей новой точки зрения классическая механика проста потому, что почти во всех наблюдениях мы имеем дело со скоростями, значительно меньшими, чем скорость света.

Покоящееся тело имеет определенную массу, так называемую *массу покоя*. Мы знаем из механики, что всякое тело сопротивляется изменению его движения; чем больше

масса, тем сильнее сопротивление, и чем меньше масса, тем слабее сопротивление. Но в теории относительности мы имеем нечто большее. Тело сопротивляется изменению сильнее не только в случае, когда больше масса покоя, но и в случае, когда его скорость больше. Тела, скорости которых приближались бы к скорости света, оказывали бы очень сильное сопротивление внешним силам. В классической механике сопротивление данного тела есть всегда нечто неизменное, характеризующее только его массой. В теории относительности оно зависит и от массы покоя, и от скорости. Сопротивление становится бесконечно большим по мере того, как скорость приближается к скорости света.

Только что указанные выводы позволяют нам подвергнуть теорию экспериментальной проверке. Оказывают ли снаряды, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, сопротивление действию внешней силы так, как это предсказывает теория? Так как положения теории относительности имеют в этом отношении количественный характер, то мы могли бы подтвердить или опровергнуть теорию, если бы мы обладали снарядами, движущимися со скоростями, близкими к скорости света.

На самом деле мы находим в природе снаряды, движущиеся с такими скоростями. Атомы радиоактивного вещества, например радия, действуют подобно батарее, которая стреляет снарядами, движущимися с огромными скоростями. Не входя в детали, мы можем указать только на один из самых важных взглядов современной физики и химии. Все вещество в мире построено из элементарных частиц, число разновидностей которых невелико. Подобно этому в одном городе здания различны по величине, конструкции и архитектуре, но на постройку всех их, от хижин до небоскреба, использованы кирпичи лишь очень немногих сортов, одинаковых во всех зданиях. Так, все известные химические элементы нашего материального мира — от легчайшего водорода до наиболее тяжелого урана — построены из одинакового рода кирпичей, т. е. одинакового рода элементарных частиц. Наиболее тяжелые элементы — наиболее сложные построения — неустойчивы, и они распадаются или, как мы говорим, они радиоактивны. Некоторые кирпичи, т. е. элементарные частицы,

из которых состоят радиоактивные атомы, выбрасываются иногда с очень большими скоростями, близкими к скорости света. Атом элемента, скажем, радия, согласно нашим современным взглядам, подтвержденным многочисленными экспериментами, обладает сложной структурой, и радиоактивный распад является одним из тех явлений, в которых выявляется, что атом построен из более простых кирпичей — элементарных частиц.

С помощью очень остроумных и сложных экспериментов мы можем обнаружить, как частицы сопротивляются действию внешней силы. Эксперименты показывают, что сопротивление, оказываемое этими частицами, зависит от скорости и как раз так, как это предсказывается теорией относительности. Во многих других случаях, где можно было обнаружить зависимость сопротивления от скорости, было установлено полное согласие между теорией относительности и экспериментом. Мы еще раз видим существенные черты творческой работы в науке: предсказание определенных фактов теорией и подтверждение их экспериментом.

Этот результат приводит к дальнейшему важному обобщению. Покоящееся тело имеет массу, но не имеет кинетической энергии, т. е. энергии движения. Движущееся тело имеет и массу, и кинетическую энергию. Оно сопротивляется изменению скорости сильнее, чем покоящееся тело. Кажется, что как будто кинетическая энергия движущегося тела увеличивает его сопротивление. Если два тела имеют одинаковую массу покоя, то тело с большей кинетической энергией сопротивляется действию внешней силы сильнее.

Представим себе ящик, наполненный шарами; пусть ящик и шары покоятся в нашей системе координат. Чтобы привести его в движение, чтобы увеличить его скорость, требуется некоторая сила. Но будет ли эта сила производить то же самое увеличение скорости за тот же промежуток времени, если шары в ящике будут быстро двигаться по всем направлениям, подобно молекулам в газе, со средними скоростями, близкими к скорости света? Теперь необходима будет большая сила, так как возросшая кинетическая энергия шаров усиливает сопротивление ящика. Энергия, во всяком случае кинетическая энергия, сопро-

тивляется движению так же, как и весома́я масса. Справедливо ли это и в отношении всех видов энергии?

Теория относительности, исходя из своих основных положений, дает ясный и убедительный ответ на этот вопрос, ответ опять-таки количественного характера: всякая энергия сопротивляется изменению движения; всякая энергия ведет себя подобно веществу; кусок железа весит больше, когда он раскален докрасна, чем когда он холоден; излучение, испускаемое Солнцем и проходящее через пространство, содержит энергию и поэтому имеет массу; Солнце и все излучающие звезды теряют массу вследствие излучения. Это заключение, совершенно общее по своему характеру, является важным достижением теории относительности и соответствует всем фактам, которые привлекались для его проверки.

Классическая физика допускала две субстанции: вещество и энергию. Первое имело вес, а вторая была невесома. В классической физике мы имели два закона сохранения: один для вещества, другой для энергии. Мы уже ставили вопрос о том, сохраняет ли еще современная физика этот взгляд на две субстанции и два закона сохранения. Ответ таков: нет. Согласно теории относительности нет существенного различия между массой и энергией. Энергия имеет массу, а масса представляет собой энергию. Вместо двух законов сохранения мы имеем только один: закон сохранения массы — энергии. Этот новый взгляд оказался очень плодотворным в дальнейшем развитии физики.

Как это случилось, что тот факт, что энергия обладает массой, а масса представляет собой энергию, столь долго оставался неизвестным? Весит ли кусок нагретого железа больше, чем кусок холодного? Теперь мы отвечаем «да», а раньше (см. стр. 38) отвечали «нет». Страницы, лежащие между этими двумя ответами, разумеется, не могут скрыть этого противоречия.

Трудности, стоящие здесь перед нами, того же порядка, какие встречались нам и прежде. Изменение массы, предсказанное теорией относительности, неизмеримо мало, его нельзя обнаружить прямым взвешиванием даже с помощью очень чувствительных весов. Доказательство того, что энергия не невесома, можно получить многими очень убедительными, но косвенными путями.



Причина этого недостатка непосредственной очевидности состоит в очень малой величине обмена между веществом и энергией. Энергия по отношению к массе подобна обесцененной валюте, взятой по отношению к валюте высокой ценности. Один пример сделает это ясным. Количество теплоты, способное превратить тридцать тысяч тонн воды в пар, весило бы около одного грамма. Энергия столь долго считалась невесомой просто потому, что масса, которую она представляет, слишком мала.

Старая энергия-субстанция есть вторая жертва теории относительности. Первой была среда, в которой распространялись световые волны.

Влияние теории относительности выходит далеко за пределы тех проблем, из которых она возникла. Она снимает трудности и противоречия теории поля; она формулирует более общие механические законы; она заменяет два закона сохранения одним; она изменяет наше классическое понятие абсолютного времени. Ее ценность не ограничивается лишь сферой физики; она образует общий остов, охватывающий все явления природы.

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КОНТИНУУМ

«Французская революция началась в Париже 14-го июля 1789 года». В этом предложении установлены место и время события. Тому, кто слышит это утверждение впервые и кто не знает, что значит «Париж», можно было бы сказать: это — город на нашей земле, расположенный на  $2^\circ$  восточной долготы и  $49^\circ$  северной широты. Два числа характеризовали бы тогда место, а «14 июля 1789 года» — время, в которое произошло событие. В физике точная характеристика, когда и где произошло событие, чрезвычайно важна, гораздо важнее, чем в истории, так как эти числа образуют основу количественного описания.

Ради простоты мы рассматривали прежде только движение вдоль прямой. Нашей координатной системой был твердый стержень с началом, но без конца. Сохраним это ограничение. Отметим на стержне различные точки; положение каждой из них может быть охарактеризовано только

одним числом — координатой точки. Сказать, что координата точки равна 7,586 метра, означает, что ее расстояние от начала стержня равно 7,586 метра. Наоборот, если кто-то задает мне любое число и единицу измерения, я всегда могу найти точку на стержне, соответствующую этому числу. Мы видим, что каждому числу соответствует определенная точка на стержне, а каждой точке соответствует определенное число. Этот факт выражается математиками

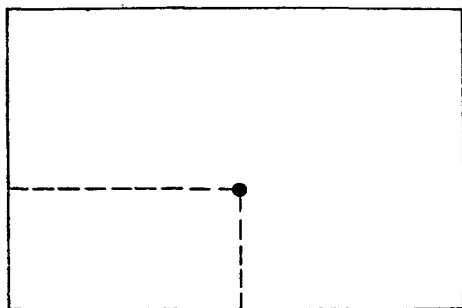


Рис. 59.

в следующем предложении: *все точки стержня образуют одномерный континуум*. Тогда существует точка, сколь угодно близкая к данной точке стержня. Мы можем связать две отдаленные точки на стержне рядом отрезков, расположенных один за другим, каждый из которых сколь угодно мал. Таким образом, тот

факт, что отрезки, связывающие отдаленные точки, произвольно малы, является характеристикой континуума.

Возьмем другой пример. Пусть мы имеем плоскость или, если вы предпочитаете что-либо более конкретное, поверхность прямоугольного стола (рис. 59). Положение точки на этом столе можно охарактеризовать двумя числами, а не одним, как раньше. Два числа суть расстояния от двух перпендикулярных краев стола. Не одно число, а пара чисел соответствует каждой точке плоскости; каждой паре чисел соответствует определенная точка. Другими словами: *плоскость есть двумерный континуум*. Тогда существуют точки, сколь угодно близкие к данной точке плоскости. Две отдаленные точки могут быть связаны кривой, разделенной на отрезки, сколь угодно малые. Таким образом, произвольная малость отрезков, последовательно укладываемых на кривой, связывающей две отдаленные точки, каждая из которых может быть определена двумя числами, снова является характеристикой двумерного континуума.

Еще один пример. Представим себе, что вы хотите в качестве системы координат рассматривать свою комнату. Это означает, что вы хотите любое положение тела определить относительно стен комнаты. Положение кончика лампы, если она в покое, может быть описано тремя

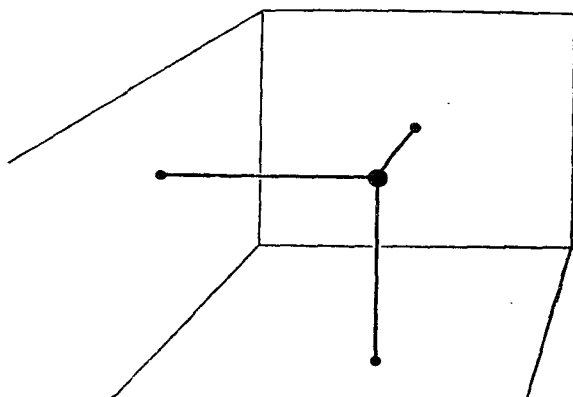


Рис. 60.

числами: два из них определяют расстояние от двух перпендикулярных стен, а третье — расстояние от пола или потолка. Каждой точке пространства соответствуют три определенных числа; каждым трем числам соответствует определенная точка в пространстве (рис. 60). Это выражается предложением: *наше пространство есть трехмерный континуум*. Существуют точки, весьма близкие к каждой данной точке пространства. И опять произвольная малость отрезков линии, связывающей отдаленные точки, каждая из которых представлена тремя числами, есть характеристика трехмерного континуума.

Время в секундах	Высота над землей в метрах
0	80
1	75
2	60
3	35
4	0

Но все это едва ли физика. Чтобы вернуться к физике, нужно рассмотреть движение материальных частиц. Чтобы исследовать и предсказывать явления в природе, необ-

ходимо рассматривать не только место, но и время физических событий. Возьмем снова очень простой пример.

Маленький камешек, который примем за частицу, падает с башни. Допустим, что высота башни равна 80 метрам. Со времен Галилея мы в состоянии предсказать координаты камня в произвольный момент времени после начала его падения. На стр. 167 представлена «временная таблица», приближенно описывающая положение камня после 1, 2, 3 и 4 секунд.

В нашей «временной таблице» зарегистрированы пять событий, каждое из которых представлено двумя числами — временем и пространственной координатой каждого события. Первое событие есть начало движения камня с высоты 80 метров от земли в момент, равный нулю. Второе событие есть совпадение камня с нашим твердым стержнем (башней) на высоте 75 метров от земли. Это имеет место по истечении одной секунды. Последнее событие есть удар камня о землю.

Те сведения, которые записаны во «временной таблице», можно было бы представить иначе. Пять пар чисел ее можно было бы представить, как пять точек на плоскости. Установим сначала масштаб. Например: пусть один отрезок будет представлять метр, а другой секунду (рис. 61).

Затем нарисуем две перпендикулярные линии, одну из них, скажем, горизонтальную, назовем временной осью, вертикальную же — пространственной осью. Мы сразу же видим, что нашу «временную таблицу» можно представить пятью точками в пространственно-временной плоскости (рис. 62).

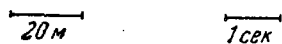


Рис. 61.

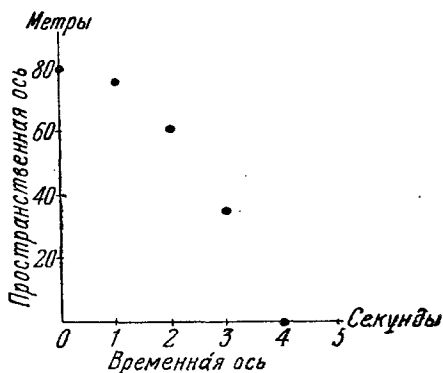


Рис. 62.

Расстояния точек от пространственной оси представляют собой координаты времени, указанные в первой колонке «временной таблицы», а расстояния от оси времен — их пространственные координаты.

Одна и та же связь выражена двумя способами: с помощью «временной таблицы» и точками на плоскости. Одно может быть построено из другого. Выбор между этими двумя представлениями является делом лишь вкуса, ибо в действительности они оба эквивалентны.

Сделаем теперь еще один шаг. Представим себе улучшенную «временную таблицу», дающую положения не для каждой секунды, а, скажем, для каждой сотой или тысячной доли секунды. Тогда у нас будет много точек в нашей пространственно-временной плоскости. Наконец, если положение дается для каждого мгновения или, как

говорят математики, если пространственная координата дается как функция времени, то совокупность точек становится непрерывной линией. Поэтому наш следующий рисунок дает не отрывочные сведения, как прежде, а полное представление о движении камня.

Движение вдоль твердого стержня (башни), т. е. движение в одномерном пространстве, представлено здесь в виде кривой в двухмерном пространственно-временном континууме. Каждой точке в нашем пространственно-временном континууме соответствует пара чисел, одно из которых отмечает временную, а другое — пространственную координату. Наоборот: определенная точка в нашем пространственно-временном континууме соответствует некоторой паре чисел, характеризующей событие. Две соседние точки представляют собой два события, прошедшие в местах, близких друг от друга, и в моменты времени, непосредственно следующие друг за другом.

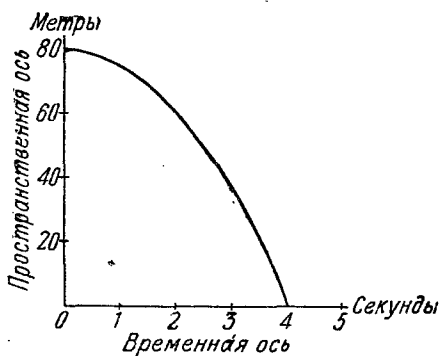


Рис. 63.

Вы могли бы возразить против нашего способа представления следующим образом: мало смысла в представлении единицы времени отрезком, в его механическом соединении с пространством, образующим двухмерный континуум из двух одномерных континуумов. Но тогда вы должны были бы столь же серьезно протестовать против всех графиков, представляющих, например, изменение температуры в Нью-Йорке в течение последнего лета, или против графиков, изображающих изменение стоимости жизни за последние несколько лет, так как в каждом из этих случаев употребляется тот же самый метод. В температурных графиках одномерный температурный континуум соединяется с одномерным временным континуумом в двухмерный температурно-временной континуум.

Вернемся к частице, падающей с 80-метровой башни. Наша графическая картина движения есть полезное соглашение, так как она позволяет нам характеризовать положение частицы в любой произвольный момент времени. Зная, как движется частица мы хотели бы изобразить ее движение еще раз. Сделать это можно двумя путями.

Вспомним изображение частиц, изменяющих свое положение со временем в одномерном пространстве. Мы изображаем движение как ряд событий в одномерном пространственном континууме. Мы не смешиваем время и пространство, применяя *динамическую* картину, в которой положения *изменяются* со временем.

Но можно изобразить то же самое движение другим путем. Мы можем образовать *статическую* картину, рассматривая кривую в двухмерном пространственно-временном континууме. Теперь движение рассматривается как нечто, что *есть*, что существует в двухмерном пространственно-временном континууме, а не как нечто, изменяющееся в одномерном пространственном континууме.

Обе эти картины совершенно равноценны, и предпочтение одной из них перед другой есть дело лишь соглашения и вкуса.

То, что здесь сказано о двух картинах движения, не имеет отношения к теории относительности. Оба представления могут быть использованы с одинаковым правом, хотя классическая теория скорее предпочитала динамичес-

кую картину описания движения, как того, что происходит в пространстве, статической картине, описывающей его в пространстве-времени. Но теория относительности изменила этот взгляд. Она явно предпочла статическую картину и нашла в этом представлении движения, как того, что существует в пространстве-времени, более удобную и более объективную картину реальности. Мы должны еще ответить на вопрос, почему эти две картины эквивалентны с точки зрения классической физики и не эквивалентны с точки зрения теории относительности. Ответ будет понятным, если снова рассмотрим две системы координат, движущиеся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

Согласно классической физике наблюдатели в обеих системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, найдут для одного и того же события различные пространственные координаты, но одну и ту же временную координату. Таким образом, в нашем примере удар камня о землю характеризуется при нашем выборе системы координат временной координатой «4» и пространственной координатой «0». Согласно классической механике наблюдатели, движущиеся прямолинейно и равномерно относительно выбранной системы координат, обнаружат, что камень достигнет земли спустя четыре секунды после начала падения. Но каждый из наблюдателей относит расстояние к своей системе координат, и они будут, вообще говоря, связывать различные пространственные координаты с событием соударения, хотя временная координата будет одной и той же для всех других наблюдателей, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Классическая физика знает только «абсолютное» время, текущее одинаково для всех наблюдателей. Для каждой системы координат двухмерный континуум может быть разбит на два одномерных континуума: время и пространство. Благодаря «абсолютному» характеру времени переход от «статики» к «динамической» картине движения имеет в классической физике объективный смысл.

Но мы уже убедились в том, что классические преобразования не могут применяться в физике в общем случае. С практической точки зрения они еще пригодны для малых скоростей, но не годятся для обоснования фундаментальных физических вопросов.

Согласно теории относительности момент соударения камня с землей не будет одним и тем же для всех наблюдателей. И временная координата, и пространственная координата будут различными в двух различных системах координат, и изменение временной координаты будет весьма заметным, если относительная скорость систем приближается к скорости света. Двухмерный континуум не может быть разбит на два одномерных континуума, как в классической физике. Мы не можем рассматривать пространство и время раздельно при определении пространственно-временных координат в другой системе координат. Разделение двухмерного континуума на два одномерных оказывается, с точки зрения теории относительности, произвольным процессом, не имеющим объективного смысла.

Все, что мы только что сказали, нетрудно обобщить для случая движения, не ограниченного прямой линией. В самом деле, для описания событий в природе нужно применить не два, а четыре числа. Физическое пространство, постигаемое через объекты и их движения, имеет три измерения, и положения объектов характеризуются тремя числами. Момент события есть четвертое число. Каждому событию соответствует четыре определенных числа; каким-либо четверем числам соответствует определенное событие. Поэтому: мир событий образует *четырёхмерный континуум*. В этом нет ничего мистического, и последнее предложение одинаково справедливо и для классической физики, и для теории относительности. И опять различие обнаруживается лишь тогда, когда рассматриваются две системы координат, движущиеся друг относительно друга. Пусть движется комната, а наблюдатели внутри и вне ее определяют пространственно-временные координаты одних и тех же событий. Странник классической физики разобьет четырехмерный континуум на трехмерное пространство и одномерный временной континуум. Старый физик заботится только о преобразовании пространства, так как время для него абсолютно. Он находит разбиение четырехмерного мирового континуума на пространство и время естественным и удобным. Но с точки зрения теории относительности время, так же как и пространство, изменяется при переходе от одной системы координат к другой, и преобразования Лоренца рассматривают трансформационные свойства



четырёхмерного пространственно-временного континуума — нашего четырёхмерного мира событий.

Мир событий может быть описан динамически с помощью картины, изменяющейся во времени и набросанной на фоне трёхмерного пространства. Но он может быть также описан посредством статической картины, набросанной на фоне четырёхмерного пространственно-временного континуума. С точки зрения классической физики обе картины, динамическая и статическая, — равноценны. Но с точки зрения теории относительности статическая картина более удобна и более объективна.

Даже в теории относительности мы можем еще употреблять динамическую картину, если мы ее предпочитаем. Но мы должны помнить, что это деление на время и пространство не имеет объективного смысла, так как время больше не является «абсолютным». Дальше мы еще будем пользоваться «динамическим», а не «статическим» языком, но при этом всегда будем учитывать его ограниченность.

## ОБЩАЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Остается выяснить еще один момент. Пока еще не решен один из наиболее фундаментальных вопросов: существует ли инерциальная система? Мы узнали кое-что о законах природы, их инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца и их справедливости во всех инерциальных системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Мы имеем законы, но не знаем того «тела отсчета», к которому следует их отнести.

Для того чтобы больше знать об этих трудностях, побеседуем с физиком, стоящим на позиции классической физики, и зададим ему несколько простых вопросов:

— «Что такое инерциальная система?»

— «Это система координат, в которой справедливы законы механики. Тело, на которое не действуют внешние силы, движется в такой системе прямолинейно и равномерно. Это свойство позволяет нам, следовательно, отличить инерциальную систему координат от всякой другой».

— «Но что значит, что на тело не действуют никакие внешние силы?»

— «Это просто значит, что тело движется прямолинейно и равномерно в инерциальной системе координат».

Здесь вы могли бы еще раз поставить вопрос: «Что же такое инерциальная система координат?» Но, поскольку имеется мало надежд получить ответ, отличный от вышеприведенного, постараемся добиться конкретной информации, изменив вопрос:

— «Является ли система, жестко связанная с Землей, инерциальной?»

— «Нет, потому что законы механики не являются строго справедливыми на Земле, благодаря ее вращению. Систему координат, жестко связанную с Солнцем, можно считать инерциальной при решении многих проблем; но, когда мы говорим о вращении Солнца, мы снова заключаем, что жестко связанную с ним систему координат нельзя считать строго инерциальной».

— «Тогда, что конкретно является вашей инерциальной системой координат и как следует выбрать состояние ее движения?»

— «Это только полезная фикция, и у меня нет никакого представления о том, как ее реализовать. Если бы только я мог изолироваться от всех материальных тел и освободиться от всех внешних влияний, то моя система координат была бы инерциальной».

— «Но что вы имеете в виду, говоря о системе координат, свободной от всех внешних влияний?»

— «Я имею в виду, что система координат инерциальна». — Мы вновь вернулись к нашему первоначальному вопросу!

Наша беседа обнаруживает серьезную трудность в классической физике. Мы имеем законы, но не знаем, каково то тело отсчета, к которому следует их отнести, и все наше физическое построение оказывается возведенным на песке.

Мы можем подойти к той же трудности с другой точки зрения. Постараемся представить себе, что во всей Вселенной существует только одно тело, образующее нашу систему координат. Это тело начинает вращаться. Согласно классической механике физические законы для вращающегося тела отличны от законов для невращающегося тела. Если принцип инерции справедлив в одном случае, то он

несправедлив в другом. Но все это звучит очень сомнительно. Позволительно ли рассматривать движение лишь одного тела во всей Вселенной? Под движением тела мы всегда разумеем изменение его положения относительно другого тела. Поэтому говорить о движении одного-единственного тела значит противоречить здравому смыслу. Классическая механика и здравый смысл сильно расходятся в этом пункте. Рецепт Ньютона таков: если принцип инерции имеет силу, то система координат либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно. Если принцип инерции не имеет силы, то тело не находится в прямолинейном и равномерном движении. Таким образом, наш вывод о движении или покое зависит от того, применимы или нет все физические законы к данной системе координат.

Возьмем два тела, например Солнце и Землю. Движение, которое мы наблюдаем, опять *относительное*. Его можно описать с помощью системы координат, связанной либо с Землей, либо с Солнцем. С этой точки зрения великое достижение Коперника состоит в переносе системы координат с Земли на Солнце. Но поскольку движение относительно и можно применить любое тело отсчета, то оказывается, что нет никаких оснований для того, чтобы предпочесть одну систему координат другой.

Снова вмешивается физика и изменяет нашу общепринятую точку зрения. Система координат, связанная с Солнцем, имеет с инерциальной системой большее сходство, чем система, связанная с Землей. Физические законы предпочтительнее применять в системе Коперника, чем в системе Птолемея. Величие открытия Коперника может быть высоко оценено лишь с физической точки зрения. Физика показывает, что для описания движения планет система координат, жестко связанная с Солнцем, имеет огромные преимущества.

В классической физике нет никакого абсолютного прямолинейного и равномерного движения. Если две системы координат движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, то нет никаких оснований говорить: «Эта система покоится, а другая движется». Но если обе системы координат находятся в непрямолинейном и неравномерном движении друг относительно друга, то имеется полное основание сказать: «Это тело движется, а другое

покоится (или движется прямолинейно и равномерно)». Абсолютное движение имеет здесь вполне определенный смысл. В этом месте между здравым смыслом и классической физикой имеется широкая пропасть. Упомянутые трудности, касающиеся инерциальной системы, а также и трудности, касающиеся абсолютного движения, тесно связаны между собой. Абсолютное движение становится возможным только благодаря идее об инерциальной системе, для которой справедливы законы природы.

Может показаться, что будто бы нет выхода из этих трудностей, что будто бы никакая физическая теория не может избежать их. Источник их лежит в том, что законы природы справедливы только для особого класса систем координат, а именно, для инерциальных. Возможность разрешения этих трудностей зависит от ответа на следующий вопрос. Можем ли мы сформулировать физические законы таким образом, чтобы они были справедливыми для всех систем координат, не только для систем, движущихся прямолинейно и равномерно, но и для систем, движущихся совершенно произвольно по отношению друг к другу? Если это можно сделать, то наши трудности будут разрешены. Тогда мы будем в состоянии применять законы природы в любой системе координат. Борьба между воззрениями Птолемея и Коперника, столь жестокая в ранние дни науки, стала бы тогда совершенно бессмысленной. Любая система координат могла бы применяться с одинаковым основанием. Два предложения — «Солнце покоится, а Земля движется» и «Солнце движется, а Земля покоится» — означали бы просто два различных соглашения о двух различных системах координат.

Могли ли бы мы построить реальную релятивистскую физику, справедливую во всех системах координат; физику, в которой имело бы место не абсолютное, а лишь относительное движение? Это, в самом деле, оказывается возможным!

У нас есть по крайней мере одно, хотя и очень слабое, указание о том, как построить новую физику. Действительно, релятивистская физика должна применяться во всех системах координат, а стало быть и в специальном случае — в инерциальной системе. Мы уже знаем законы для этой инерциальной системы координат. Новые общие

законы, справедливые для всех систем координат, должны в специальном случае инерциальной системы сводиться к старым, известным законам.

Проблема формулирования физических законов для всякой системы координат была разрешена так называемой *общей теорией относительности*; предыдущая теория, применяемая только к инерциальным системам, называется *специальной теорией относительности*. Эти две теории не могут, разумеется, противоречить друг другу, так как мы всегда должны включать установленные ранее законы специальной теории относительности в общие законы для случая неинерциальной системы. Но если раньше инерциальная система координат была единственной, для которой были сформулированы физические законы, то теперь она будет представлять особый предельный случай, поскольку допустимы любые системы координат, движущиеся произвольно по отношению друг к другу.

Такова программа общей теории относительности. Но, обрисовывая путь, каким она создавалась, мы должны быть еще менее конкретными, чем это было до сих пор. Новые трудности, возникающие в процессе развития науки, вынуждают нашу теорию становиться все более и более абстрактной. Нас ожидает еще ряд неожиданностей. Но наша постоянная конечная цель — все лучшее и лучшее понимание реальности. К логической цепи, связывающей теорию и наблюдение, прибавляются новые звенья. Чтобы очистить путь, ведущий от теории к эксперименту, от ненужных и искусственных допущений, чтобы охватить все более обширную область фактов, мы должны делать цепь все длиннее и длиннее. Чем проще и фундаментальнее становятся наши допущения, тем сложнее математическое орудие нашего рассуждения; путь от теории к наблюдению становится длиннее, тоньше и сложнее. Хотя это и звучит парадоксально, но мы можем сказать: современная физика проще, чем старая физика, и поэтому она кажется более трудной и запутанной. Чем проще наша картина внешнего мира и чем больше фактов она охватывает, тем резче отражает она в наших умах гармонию Вселенной.

Наша новая идея проста: построить физику, справедливую для всех систем координат. Осуществление этой идеи приносит формальное усложнение и вынуждает нас

использовать математические методы, отличные от тех, которые до сих пор применялись в физике. Мы покажем здесь только связь между осуществлением этой программы и двумя принципиальными проблемами: тяготением и геометрией.

### ВНЕ И ВНУТРИ ЛИФТА

Закон инерции является первым большим успехом в физике, фактически ее действительным началом. Он был получен размышлением об идеализированном эксперименте, о теле, постоянно движущемся без трения и без воздействия каких-либо других внешних сил. Из этого примера, а позднее из многих других, мы узнали о важности идеализированного эксперимента, созданного мышлением. Здесь тоже будут обсуждаться идеализированные эксперименты. Хотя они и могут выглядеть весьма фантастично, тем не менее они помогут нам понять в относительности столько, сколько это возможно с помощью наших простых методов.

Раньше у нас был идеализированный эксперимент с прямолинейно и равномерно движущейся комнатой. Здесь мы будем иметь дело с падающим лифтом.

Представим себе огромный лифт на башне небоскреба, гораздо более высокого, чем какой-либо из действительно построенных. Внезапно канат, поддерживающий лифт, обрывается, и лифт свободно падает по направлению к земле. Во время падения наблюдатели в лифте производят опыты. Описывая их, мы можем не заботиться о сопротивлении воздуха или трении, потому что в наших идеализированных условиях можно пренебречь их наличием. Один из наблюдателей вынимает платок и часы из своего кармана и выпускает их из рук. Что происходит с этими предметами? Для внешнего наблюдателя, который смотрит через окно лифта, и платок, и часы падают по направлению к земле с одинаковым ускорением. Мы помним, что ускорение падающих тел совершенно независимо от их масс, и это было тем фактом, который обнаружил равенство тяжелой и инертной массы (стр. 33). Мы помним также, что равенство двух масс — тяжелой и инертной — с точки зрения классической механики было совершенно случайным фактом и не играло никакой роли в ее структуре.

Однако здесь это равенство, отраженное в равенстве ускорения всех падающих тел, существенно и составляет основу всех наших рассуждений.

Вернемся к падающему платку и часам; для внешнего наблюдателя оба предмета падают с одинаковым ускорением. Но таково же ускорение и лифта, его стен, пола и потолка. Поэтому расстояние между обоими телами и полом не изменится. Для внутреннего наблюдателя оба тела остаются точно там же, где они были в тот момент, когда наблюдатель выпустил их из рук. Внутренний наблюдатель может игнорировать поле тяготения, так как источник последнего лежит вне его системы координат. Он находит, что никакие силы внутри лифта не действуют на оба тела, и, таким образом, они остаются в покое, как если бы они находились в инерциальной системе. Странные вещи происходят в лифте! Если наблюдатель толкает тело в каком-либо направлении, например вверх или вниз, то оно всегда движется прямолинейно и равномерно, пока не столкнется с потолком или полом лифта. Короче говоря, законы классической механики справедливы для наблюдателя внутри лифта. Все тела ведут себя так, как следовало ожидать по закону инерции. Наша новая система координат, жестко связанная со свободно падающим лифтом, отличается от инерциальной системы лишь в одном отношении. В инерциальной системе координат движущееся тело, на которое не действуют никакие силы, будет вечно двигаться прямолинейно и равномерно. Инерциальная система координат, рассматриваемая в классической физике, не ограничена ни в пространстве, ни во времени. Однако рассматриваемый случай с наблюдателем, находящимся в лифте, иной. Инерциальный характер его системы координат ограничен в пространстве и времени. Рано или поздно прямолинейно и равномерно движущееся тело столкнется со стенками лифта; при этом прямолинейное и равномерное движение нарушится. Рано или поздно весь лифт столкнется с землей, уничтожив наблюдателей и их опыты. Эта система координат является лишь «карманным изданием» реальной инерциальной системы.

Этот локальный характер системы координат весьма существен. Если бы наш воображаемый лифт достигал

размеров от Северного полюса до экватора и платок был бы помещен на Северном полюсе, а часы на экваторе, то для внешнего наблюдателя оба тела не имели бы одинакового ускорения; они не были бы в покое друг относительно друга. Все наши рассуждения потерпели бы крушение! Размеры лифта должны быть ограничены так, чтобы можно было предположить равенство ускорений всех тел по отношению к внешнему наблюдателю.

С этим ограничением система координат, связанная с падающим лифтом, инерциальна для внутреннего наблюдателя. По крайней мере мы можем указать систему координат, в которой справедливы все физические законы, хотя она и ограничена во времени и пространстве. Если мы вообразим другую систему координат, другой лифт, движущийся прямолинейно и равномерно относительно свободно падающего, то обе эти системы координат будут локально инерциальными. Все законы совершенно одинаковы в обеих системах. Переход от одной системы к другой дается преобразованием Лоренца.

Посмотрим, каким путем оба наблюдателя, внешний и внутренний, описывают то, что происходит в лифте.

Внешний наблюдатель замечает движение лифта и всех тел в нем, и находит его соответствующим закону тяготения Ньютона. Для него движение является не равномерным, а ускоренным, вследствие действия поля тяготения земли.

Однако, поколение физиков, рожденное и воспитанное в лифте, рассуждало бы совершенно иначе. Оно было бы уверено в том, что оно обладает инерциальной системой, и относило бы все законы природы к своему лифту, заявляя с уверенностью, что законы принимают особенно простую форму в их системе координат. Для них было бы естественным считать свой лифт покоящимся и свою систему координат инерциальной.

Невозможно установить принципиальное различие между внешним и внутренним наблюдателем. Каждый из них мог бы претендовать на право отнести все события к своей системе координат. Оба описания событий можно было бы сделать одинаково последовательными.

Из этого примера мы видим, что последовательное описание физических явлений в двух различных системах координат возможно, даже если они не движутся прямо-



линейно и равномерно друг относительно друга. Но для такого описания мы должны принять во внимание тяготение, создающее, так сказать, «мост», позволяющий перейти от одной системы координат к другой. Поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего наблюдателя оно не существует. Ускоренное движение лифта в поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего же наблюдателя — покой и отсутствие поля тяготения. Но «мост», т. е. поле тяготения, делающее описание в обеих системах координат возможным, покоится на одной очень важной опоре: эквивалентности тяжелой и инертной масс. Без этой руководящей идеи, оставшейся незамеченной в классической механике, наши теперешние рассуждения полностью отпали бы.

Возьмем несколько иной идеализированный эксперимент. Пусть имеется инерциальная система координат, в которой справедлив закон инерции. Мы уже описывали то, что происходит в лифте, покоящемся в такой инерциальной системе. Но теперь мы изменим картину. Кто-то извне привязал к лифту канат и тянет его с постоянной силой в направлении, указанном на рисунке 64. Неважно, как это осуществлено. Так как законы механики справедливы в этой системе координат, то лифт в целом движется с постоянным ускорением в направлении движения. Будем опять слушать объяснения явлений, происходящих в лифте, даваемые внешним и внутренним наблюдателями.

*Внешний наблюдатель.* Моя система координат инерциальна. Лифт движется с постоянным ускорением, потому что подвергается воздействию постоянной силы. Наблюдатели внутри лифта находятся в абсолютном движении, для них законы механики несправедливы. Они не находят, что тела, на которые не действуют силы, покоятся. Если тело остается свободным, оно скоро столкнется с полом лифта, так как пол движется вверх по направлению к телу. Это происходит одинаково и с часами, и с платком. Мне кажется очень странным, что наблюдатель внутри лифта

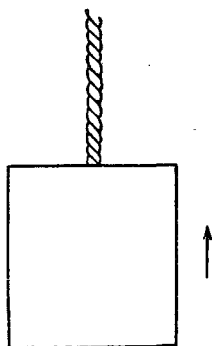


Рис. 64.

должен всегда быть на «полу», потому что, как только он прыгает, пол достигнет его вновь.

*Внутренний наблюдатель.* Я не вижу какого-либо основания считать, что мой лифт находится в абсолютном движении. Я согласен, что моя система координат, жестко связанная с лифтом, фактически не инерциальна, но я не думаю, что это имеет какое-то отношение к абсолютному движению. Мои часы, платок и все тела падают потому, что лифт в целом находится в поле тяготения. Я замечаю движение точно такого же рода, как и человек на Земле. Он объясняет его очень просто — действием поля тяготения. Такое же объяснение подходит и для меня.

Эти два описания — одно данное внешним, а другое — внутренним наблюдателем, — вполне последовательны, и нет возможности решить, какое из них правильно. Мы можем принять любое из них для описания явлений в лифте: либо вместе с внешним наблюдателем принять неравномерность движения и отсутствие поля тяготения, либо вместе с внутренним наблюдателем принять покой и наличие поля тяготения.

Внешний наблюдатель может предположить, что лифт находится в «абсолютном» неравномерном движении. Но движение, которое уничтожается предположением о действии поля тяготения, не может считаться абсолютным.

Возможно, что имеется выход из неопределенности, созданной наличием двух различных описаний, и, может быть, можно было бы вынести решение в пользу одного и против другого. Представим себе, что световой луч входит в лифт горизонтально через боковое окно и спустя очень короткое время достигает противоположной стены. Посмотрим, каковы будут предсказания обоих наблюдателей относительно пути луча.

*Внешний наблюдатель,* который считает, что лифт находится в ускоренном движении, утверждал бы: световой луч входит в окно и движется горизонтально вдоль прямой с постоянной скоростью по направлению к противоположной стене. Но лифт движется вверх, и за время, в течение которого свет доходит к стене, лифт изменит свое положение. Поэтому свет упадет в точку, расположенную не точно напротив точки его входа, а немного ниже (рис. 65). Смещение будет очень небольшим, но тем не менее оно существ-

ует, и световой луч проходит относительно лифта не вдоль прямой, а вдоль слабо искривленной линии. Это вызвано тем, что за то время, когда луч пересекает внутренность лифта, сам лифт смещается на некоторое расстояние.

*Внутренний наблюдатель*, который считает, что на все объекты в лифте действует поле тяготения, сказал бы: ускоренного движения лифта нет, а есть лишь действие поля тяготения. Луч света невесом и потому не будет подвергаться действию поля тяготения. Если его направить горизонтально, он упадет на стену в точке как раз напротив той, в которую он вошел.

Из этого обсуждения следует, что имеется возможность выбора одной из двух противоположных точек зрения, так как явление различалось бы для обоих наблюдателей. Если ни в одном из только что указанных объяснений нет ничего нелогичного, то все наши предыдущие рассуждения нарушаются, и мы не можем последовательно описывать все явления двумя методами, либо принимая поле тяготения, либо отказываясь от него.

Но, к счастью, в рассуждениях внутреннего наблюдателя имеется серьезная ошибка, спасающая наши предыдущие заключения. Он сказал: «Луч света невесом и потому не будет подвергаться действию поля тяготения». Но это неверно! Луч света несет энергию, а энергия имеет массу. Но на всякую инертную массу поле тяготения оказывает воздействие, так как инертная и тяжелая массы эквивалентны. Луч света будет искривляться в поле тяготения точно так же, как искривляется траектория тела, брошенного горизонтально со скоростью, равной скорости света. Если бы внутренний наблюдатель рассуждал строго и принял бы во внимание искривление световых лучей в поле тяготения, то его выводы были бы точно такими же, как и выводы внешнего наблюдателя.

Поле тяготения Земли, конечно, очень слабо для того, чтобы искривление светового луча в нем можно было обнаружить непосредственно экспериментом. Но известные опыты, сделанные во время солнечных затмений,

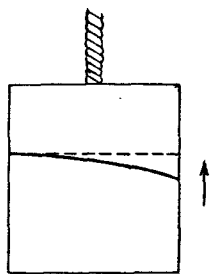


Рис. 65.

убедительно, хотя и косвенно, показывают влияние поля тяготения на путь светового луча.

Из этих примеров следует, что имеется вполне обоснованная надежда сформулировать релятивистскую физику. Но для этого мы должны сначала разрешить проблему тяготения.

Мы видели на примере с лифтом последовательность двух описаний. Можно предположить наличие неравномерности движения, а можно этого не делать. Мы можем исключить из наших примеров «абсолютное» движение с помощью поля тяготения. Но тогда в неравномерном движении нет ничего абсолютного. Поле тяготения в состоянии полностью его уничтожить.

Призраки абсолютного движения и инерциальной системы координат могут быть исключены из физики и может быть построена новая релятивистская физика. Наши идеализированные опыты показывают, как тесно связана проблема общей теории относительности с проблемой тяготения и почему эквивалентность тяжелой и инертной масс так существенна для этой связи. Ясно, что решение проблемы тяготения в общей теории относительности должно отличаться от ньютоновского. Законы тяготения, так же как и все законы природы, должны быть сформулированы для всех возможных систем координат, в то время как законы классической механики, сформулированные Ньютоном, справедливы лишь в инерциальных системах координат.

### ГЕОМЕТРИЯ И ОПЫТ

Наш следующий пример будет более фантастичным, чем пример с падающим лифтом. Мы должны подойти к новой проблеме, проблеме связи между общей теорией относительности и геометрией. Начнем с описания мира, в котором живут лишь двухмерные, а не трехмерные существа, как в нашем. Кинематограф приучил нас к двухмерным существам, действующим на двухмерном экране. Представим себе теперь, что эти теневые фигуры, действующие на экране, действительно существуют, что они обладают способностью мышления, что они могут создавать свою собственную науку, что для них двухмерный экран олицетво-

ряет геометрическое пространство. Эти существа не в состоянии представить себе наглядным образом трехмерное пространство, так же, как мы не в состоянии представить мир четырех измерений. Они могут изогнуть прямую линию; они знают, что такое круг, но они не в состоянии построить сферу, потому что это означало бы покинуть их двухмерный экран. Мы находимся в таком же положении. Мы в состоянии изогнуть и линии, и поверхности, но мы с трудом можем представить искривленное пространство.

Живя, мысля и экспериментируя, наши теневые фигуры могли бы, возможно, овладеть знанием двухмерной евклидовой геометрии. Таким образом, они могли бы доказать, что сумма углов в треугольнике равна  $180$  градусам. Они могли бы построить два круга с общим центром, один очень малый, а другой большой. Они нашли бы, что отношение длин окружностей двух таких кругов равно отношению их радиусов — результат, опять характерный для евклидовой геометрии. Если бы экран был бесконечно велик, то наши теневые существа нашли бы, что, отправившись однажды в путешествие вперед по прямой, они никогда не вернулись бы к своей отправной точке.

Представим себе теперь, что эти двухмерные существа живут в измененных условиях. Предположим, что кто-то извне, из «третьего измерения» перенес их с экрана на поверхность сферы с очень большим радиусом. Если эти тени очень малы по отношению ко всей поверхности, если у них нет средств дальнего сообщения и они не могут двигаться очень далеко, то они не обнаружат какого-либо изменения. Сумма углов в малых треугольниках еще составляет  $180$  градусов. Отношение радиусов двух малых кругов с общим центром еще равно отношению длин их окружностей.

Но пусть эти теневые существа с течением времени развивают свои теоретические и технические познания. Пусть ими найдены средства сообщения, позволяющие им быстро покрывать огромные расстояния. Тогда они найдут, что, отправляясь в путешествие прямо вперед, они, в конце концов, вернутся к своей исходной точке. «Прямо вперед» означает вдоль большого круга сферы. Они найдут также, что отношение длин двух концентрических окружностей не равно отношению радиусов, если один из радиусов мал, а другой велик.

Если наши двухмерные существа консервативны, если их поколения изучали евклидову геометрию в прошлом, когда они не могли далеко путешествовать и когда эта геометрия соответствовала наблюдаемым фактам, то они, конечно, сделают все возможное, чтобы сохранить ее, несмотря на очевидность своих измерений. Они постараются заставить физику нести бремя этих противоречий. Они станут искать какие-либо физические основания, скажем, различие температур, деформирующее линии и вызывающее отклонение от евклидовой геометрии. Но раньше или позже они должны будут найти, что имеется гораздо более логический и последовательный путь описания этих явлений. Они окончательно поймут, что их мир конечен, что его геометрические принципы отличны от тех, которые они изучали. Несмотря на свою неспособность представить себе свой мир, они поймут, что он есть двухмерная поверхность сферы. Они скоро изучат новые принципы геометрии, которая, хотя и отличается от евклидовой, тем не менее может быть сформулирована так же последовательно и логично для их двухмерного мира. Новому поколению, воспитанному на знании сферической геометрии, старая евклидова геометрия будет казаться более сложной и искусственной, так как она не соответствует наблюдаемым фактам.

Вернемся к трехмерным существам нашего мира.

Что это значит, когда утверждают, что наше трехмерное пространство имеет евклидов характер? Смысл этого в том, что все логически доказанные положения евклидовой геометрии могут быть точно подтверждены действительным экспериментом. С помощью твердых тел или световых лучей мы можем построить объекты, соответствующие идеализированным объектам евклидовой геометрии. Ребро линейки или световой луч соответствуют прямой. Сумма углов треугольника, построенного из тонких жестких стержней, равна 180 градусам. Отношение радиусов двух концентрических окружностей, построенных из тонкой упругой проволоки, равно отношению длин окружностей. Истолкованная таким образом евклидова геометрия становится главой физики, хотя и очень простой ее главой.

Но мы можем представить себе, что обнаружены противоречия: например, что сумма углов большого треуголь-

ника, построенного из стержней, которые по многим основаниям должны были считаться твердыми, не равна 180 градусам. Так как мы уже прибегали к идее конкретного представления объектов евклидовой геометрии с помощью твердых тел, то мы, вероятно, стали бы искать какие-либо физические силы, которые явились причиной такого неожиданного поведения наших стержней. Мы постарались бы найти физическую природу этих сил и их влияние на другие явления. Чтобы спасти евклидову геометрию, мы обвинили бы объекты в том, что они не тверды, что они не точно соответствуют объектам евклидовой геометрии. Мы постарались бы найти лучшие тела, ведущие себя так, как это ожидается согласно евклидовой геометрии. Если бы, однако, нам не удалось объединить евклидову геометрию и физику в простую и последовательную картину, то мы должны были бы отказаться от идеи, что наше пространство евклидово, и искать более последовательную картину реальности на основе более общих предположений о геометрических свойствах нашего пространства.

Необходимость этого может быть проиллюстрирована с помощью идеализированного эксперимента, показывающего, что действительно релятивистская физика не может основываться на евклидовой геометрии. Наши рассуждения будут предполагать, что уже известны выводы, касающиеся инерциальной системы координат, а также специальная теория относительности.

Представим себе большой диск с двумя концентрическими окружностями, нарисованными на нем; одна из этих окружностей мала, другая очень велика (рис. 66). Диск быстро вращается. Он вращается относительно внешнего наблюдателя; пусть имеется еще внутренний наблюдатель, помещающийся на диске. Предположим далее, что система координат внешнего наблюдателя инерциальна. Внешний наблюдатель может нарисовать в своей инерциальной системе две такие же окружности — малую и большую, покоящиеся в его системе, но совпадающие с окружностями на вращающемся диске. Евклидова геометрия справедлива в его системе координат, так как его система инерциальна, — так что отношение длин окружностей равно отношению радиусов. А что же находит наблюдатель на диске? С точки зрения классической физики, а также

специальной теории относительности его система координат недопустима. Но если мы стремимся найти новую форму физических законов, справедливую в любой системе координат, то мы должны рассматривать наблюдателя на диске и наблюдателя внешнего с одинаковой серьезностью. Теперь мы извне следим за попыткой внутреннего наблюдателя найти путем измерения длины окружностей и радиусов на вращающемся диске. Он использует такой же небольшой измерительный масштаб, какой был использо-

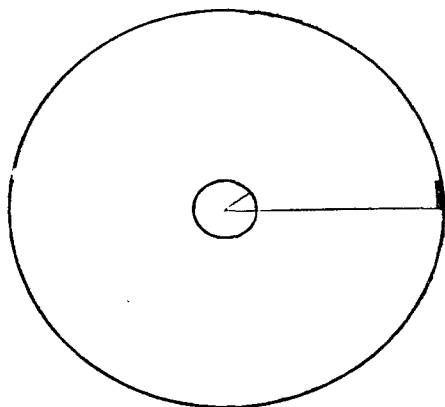


Рис. 66.

ван внешним наблюдателем. «Такой же» означает либо действительно тот же, просто переданный внешним наблюдателем внутреннему, либо один из двух масштабов, имеющих одинаковую длину в покоящейся системе координат.

Внутренний наблюдатель на диске начинает измерение радиуса и длины окружности малого круга. Его результат может оказаться таким же, как и результат внешнего на-

блюдателя. Ось, на которой вращается диск, проходит через центр. Те части диска, которые близки к центру, имеют очень небольшие скорости. Если окружность достаточно мала, мы можем спокойно применить классическую механику и не обращать внимания на специальную теорию относительности. Это означает, что отрезок имеет одинаковую длину как для внешнего, так и для внутреннего наблюдателя, и результат двух измерений будет одинаков для них обоих. Теперь наблюдатель на диске измеряет радиус большой окружности. Помещенный на радиусе отрезок движется относительно внешнего наблюдателя. Однако такой отрезок не сокращается и будет иметь одинаковую длину для обоих наблюдателей, так как направление движения перпендикулярно к отрезку. Таким образом, три измерения одинаковы для обоих наблюдателей: два



радиуса и малая окружность. Но не так обстоит дело с четвертым измерением. Длина большой окружности будет различна для обоих наблюдателей. Отрезок, помещенный на окружности в направлении движения, теперь будет казаться сокращенным для внешнего наблюдателя сравнительно с соответствующим ему покоящимся отрезком. Скорость на внешней окружности гораздо больше, чем скорость на внутренней окружности, и это сокращение должно быть учтено. Поэтому, если мы применим выводы специальной теории относительности, наше заключение будет таково: длина большой окружности должна быть различной, если она измеряется обоими наблюдателями. Так как только одна из четырех длин, измеренных обоими наблюдателями, не будет одинаковой для обоих, то для внутреннего наблюдателя отношение обоих радиусов не может быть равным отношению окружностей, как это имеет место для внешнего наблюдателя. Это означает, что наблюдатель на диске не может подтвердить справедливость евклидовой геометрии в своей системе.

После получения этого результата наблюдатель на диске может сказать, что он не хочет рассматривать систему координат, в которой несправедлива евклидова геометрия. Нарушение евклидовой геометрии обязано абсолютному вращению, тому факту, что система координат, с которой связан наблюдатель, плоха и недопустима. Но, утверждая это, он отвергает важную идею общей теории относительности. С другой стороны, если мы хотим отвергнуть абсолютное движение и сохранить идею об общей относительности, то вся физика должна быть построена на основе более общей геометрии, чем евклидова. Нет возможности избежать этих следствий, если допустимы все системы координат.

Изменения, произведенные общей теорией относительности, не могут ограничиваться одним пространством. В специальной теории относительности у нас были часы, покоящиеся в каждой из систем координат, имеющие одинаковый ритм и синхронизированные, т. е. показывающие одинаковое время в один и тот же момент. Что происходит с часами в неинерциальной системе координат? Идеализированный эксперимент с диском снова будет нам полезен. Внешний наблюдатель имеет в своей инерциальной системе

совершенные часы, которые все синхронизированы, все имеют одинаковый ритм. Внутренний наблюдатель берет двое часов одинакового сорта и помещает одни из них на малую внутреннюю окружность, а другие на большую внешнюю. Часы на внутренней окружности имеют очень небольшую скорость по отношению к внешнему наблюдателю. Поэтому мы можем спокойно заключить, что их ритм будет одинаков с ритмом внешних часов. Но часы на большой окружности имеют значительную скорость, изменяющую их ритм сравнительно с часами внешнего наблюдателя, а стало быть, и сравнительно с часами, помещенными на малой окружности. Таким образом, двое вращающихся часов будут иметь различный ритм, а применяя выводы специальной теории относительности, мы снова видим, что мы не можем во вращающейся системе создать какие-либо приборы, подобные приборам в инерциальной системе координат. Чтобы выяснить, какие выводы могут быть сделаны из этого и из описанных ранее идеализированных экспериментов, приведем еще раз разговор между старым физиком С, который верит в классическую физику, и современным физиком Н, который признает общую теорию относительности. Пусть С будет внешним наблюдателем в инерциальной системе координат, а Н — наблюдателем на вращающемся диске.

С. В вашей системе евклидова геометрия несправедлива. Я следил за вашими измерениями и я согласен, что отношение двух окружностей в вашей системе не равно отношению их радиусов. Но это показывает, что ваша система координат недопустима. А моя система — инерциального характера, и я свободно могу применять евклидову геометрию. Ваш диск находится в абсолютном движении и с точки зрения классической физики образует недопустимую систему, в которой законы механики несправедливы.

Н. Я не хочу ничего слышать об абсолютном движении. Моя система так же хороша, как и ваша. Что я заметил, так это ваше вращение по отношению к моему диску. Никто не может мне запретить отнести все движения к моему диску.

С. Но не чувствовали ли вы странной силы, стремящейся удалить вас от центра диска? Если бы ваш диск не был быстро вращающейся каруселью, то две вещи, которые вы

наблюдали, конечно, не имели бы места. Вы не заметили бы силы, толкающей вас к границе диска, и не заметили бы, что евклидова геометрия неприменима в вашей системе. Не достаточны ли эти факты, чтобы убедить вас, что ваша система находится в абсолютном движении?

Н. Вовсе нет! Я, конечно, заметил оба факта, упомянутые вами, но я полагаю, что оба они вызываются сильным полем тяготения, действующим на мой диск. Поле тяготения, направленное от центра диска, деформирует мои твердые тела и изменяет ритм моих часов. Поле тяготения, неевклидова геометрия, часы с различным ритмом — все это кажется мне тесно связанным. Принимая какую-либо систему координат, я должен одновременно предположить наличие соответствующего поля тяготения и его влияние на твердые тела и часы.

С. Но вы знаете о трудностях, вызванных вашей общей теорией относительности? Мне хотелось бы сделать свою точку зрения ясной, приведя простой не физический пример. Пред-

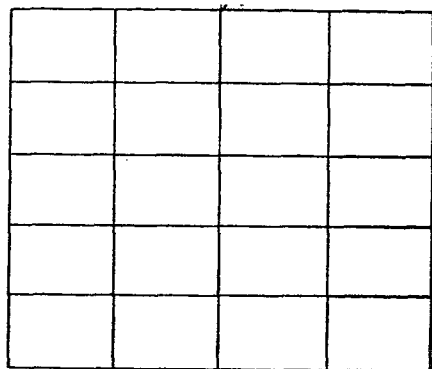


Рис. 67.

ставим себе идеализированный американский город, состоящий из параллельных улиц с параллельными проспектами, расположенными перпендикулярно к ним (рис. 67). Расстояние между улицами, а также между проспектами всюду одно и то же. Поскольку это так, то и кварталы совершенно одинаковы по величине. Таким путем я могу легко характеризовать положение любого квартала. Но это построение было бы невозможно без евклидовой геометрии. Таким образом, например, мы не можем покрыть всю нашу Землю одним большим идеальным американским городом. Один взгляд на глобус убедит вас в этом. Но мы не могли бы покрыть и ваш диск такой «американской городской конструкцией». Вы утверждаете, что ваши стержни деформированы гравитационным полем. Тот факт, что

вы не могли подтвердить теорему Евклида о равенстве отношений радиусов и окружностей, ясно показывает, что если вы продолжите такое строительство улиц и проспектов достаточно далеко, то рано или поздно вы придете к трудностям и найдете, что оно невозможно на вашем диске. Ваша геометрия на вращающемся диске подобна геометрии на кривой поверхности, где, конечно, указанное построение улиц и проспектов на достаточно большой части поверхности невозможно. Для того чтобы пример был более физическим, возьмем пластинку, неравномерно нагретую, с

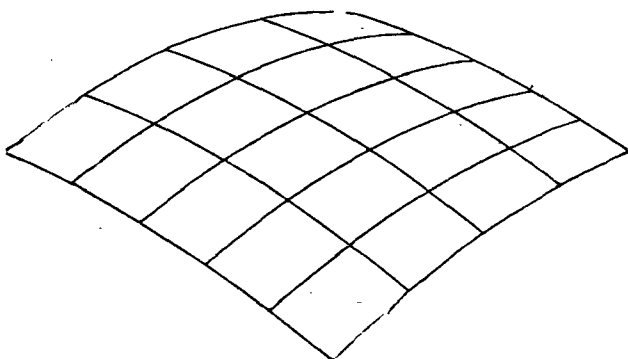


Рис. 68.

различной температурой в разных частях поверхности. Можете ли вы с помощью тонких железных прутьев, длина которых увеличивается от нагревания, выполнить «параллельно-перпендикулярное» построение, нарисованное мною ниже? Конечно, нет! Ваше «поле тяготения» разыгрывает над вашими стержнями ту же шутку, что и изменение температуры над тонкими железными прутьями.

Н. Все это не пугает меня. Построение улиц и проспектов необходимо для того, чтобы определить положения точек, часы — для того, чтобы установить порядок событий. Совсем не необходимо, чтобы город был американским: с таким же успехом он может быть и древнеевропейским. Представим себе идеализированный город, построенный из пластичного материала и затем деформированный (рис. 68). Я могу все еще подсчитать кварталы и узнать улицы и проспекты, хотя они уже больше не прямые и не

равноудалены друг от друга. Подобно этому долготы и широты отмечают положения точек на нашей Земле, хотя на ней и нельзя осуществить построения «американского города».

С. Но я вижу еще трудность. Вы вынуждены использовать вашу «европейскую городскую структуру». Я согласен, что вы можете установить порядок точек или времени событий, но это построение спутает все измерения расстояний. Оно не даст вам *метрические свойства* пространства, как это дает мое построение. Возьмем пример. Я знаю, что пройдя в моем американском городе десять кварталов, я дважды покрою расстояние пяти кварталов. Так как я знаю, что все кварталы равны, я сразу же могу определить расстояния.

Н. Это верно. В моей «европейской городской структуре» я не могу сразу же определить расстояния числом деформированных кварталов. Я должен знать кое-что большее; я должен знать геометрические свойства моей поверхности. Совершенно так же каждый знает, что расстояние между  $0^\circ$  и  $10^\circ$  долготы на экваторе не равно расстоянию между теми же долготами вблизи Северного полюса. Но всякий штурман знает, как оценить расстояние между двумя такими точками на нашей Земле, ибо он знает ее геометрические свойства. Он может сделать это либо путем подсчета, основываясь на знании сферической тригонометрии, либо экспериментальным путем, проводя свой корабль по обоим путям с одинаковой скоростью. В вашем случае вся проблема тривиальна, ибо все улицы и проспекты равно отстоят друг от друга. В случае нашей Земли это уже более сложно; два меридиана  $0^\circ$  и  $10^\circ$  пересекаются на земных полюсах и наиболее отдалены друг от друга на экваторе. Подобно этому, чтобы определять расстояния, я должен знать в своей «европейской городской структуре» нечто большее, чем вы в своей «американской городской структуре». Я могу получить эти дополнительные знания изучением геометрических свойств моего континуума в каждом отдельном случае.

С. Все это только показывает, к какому неудобству и сложности приводит потеря простой структуры евклидовой геометрии ради запутанных построений, которые вы обязаны употреблять. Действительно ли это необходимо?

Н. Боюсь, что да, если мы желаем применять нашу физику в любой системе координат, не прибегая к таинственной инерциальной системе. Я согласен, что мой математический аппарат гораздо сложнее вашего, но зато мои физические предположения более просты и естественны.

Дискуссия ограничивалась двумерным континуумом. Предмет спора в общей теории относительности еще более сложен, так как там — не двумерный, а четырехмерный пространственно-временной континуум. Но идеи те же, что и набросанные здесь для случая двумерного пространства. В общей теории относительности мы не можем применять механических построений, с помощью сети параллельно-перпендикулярных стержней и синхронизированных часов, как в специальной теории относительности. В произвольной системе координат мы не можем определить точку и момент времени, в которые произошло событие, используя твердые стержни и ритмичные и синхронизированные часы, как в инерциальной системе координат специальной теории относительности. Мы по-прежнему можем установить порядок событий с помощью наших неевклидовых стержней и часов с различным ритмом. Но действительные измерения, требующие твердых стержней и совершенных ритмичных и синхронизированных часов, могут быть выполнены только в локальной инерциальной системе. Для такой системы справедлива вся специальная теория относительности. Но наша «хорошая» система координат только локальна, ее инерциальный характер ограничен в пространстве и времени. Даже в нашей произвольной системе координат мы можем предвидеть результаты измерений, сделанные в локальной инерциальной системе. Но для этого мы должны знать геометрический характер нашего пространственно-временного континуума.

Наши идеализированные эксперименты показывают только общий характер новой релятивистской физики. Эти эксперименты показывают нам, что основной проблемой является проблема тяготения. Они показывают нам также, что общая теория относительности приводит к дальнейшему обобщению понятий времени и пространства.

ОБЩАЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ  
И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Общая теория относительности пытается сформулировать физические законы для всех систем координат. Фундаментальная проблема теории относительности есть проблема тяготения. Теория относительности сделала первое со времени Ньютона серьезное усилие заново сформулировать закон тяготения. Действительно ли это необходимо? Мы уже узнали о достижениях теории Ньютона, об огромном развитии астрономии, основанном на его законе тяготения. Ньютонов закон еще остается основой всех астрономических расчетов. Но мы узнали также о некоторых возражениях против старой теории. Ньютонов закон справедлив только в инерциальной системе координат классической физики, в системе координат, определенной, как мы помним, условием, что в ней должны быть справедливы законы механики. Сила, действующая между двумя массами, зависит от расстояния между ними. Связь между силой и расстоянием, как мы знаем, инвариантна относительно классических преобразований. Но этот закон не соответствует строению специальной теории относительности. Расстояние не инвариантно по отношению к преобразованиям Лоренца. Мы могли бы стараться, что мы и делали успешно в отношении законов движения, обобщить закон тяготения, сделать его соответствующим специальной теории относительности или, другими словами, сформулировать его так, чтобы он был инвариантным по отношению к преобразованиям Лоренца, а не по отношению к классическим преобразованиям. Но ньютонов закон тяготения упрямо сопротивляется всем нашим усилиям упростить и приспособить его к схеме специальной теории относительности. Даже если бы это и удалось нам, был бы необходим еще дальнейший шаг, шаг от инерциальной системы координат специальной теории относительности к произвольной системе общей теории относительности. С другой стороны, идеализированный эксперимент с падающим лифтом ясно показывает, что нет шансов сформулировать общую теорию относительности без разрешения проблемы тяготения. Из наших рассуждений видно, почему решение проблемы тяготения различно в классической физике и в общей теории относительности.

Мы постарались показать путь, ведущий нас к общей теории относительности, и основания, вынуждающие нас еще раз изменить наши старые взгляды. Не входя в формальную структуру теории, мы охарактеризуем некоторые черты новой теории тяготения для сравнения со старой. Не слишком трудно будет понять природу различий обеих теорий после всего, что было ранее сказано.

1. Гравитационные уравнения общей теории относительности могут быть применены к любой системе координат. Выбрать какую-либо особую систему координат в специальном случае — дело лишь удобства. Теоретически допустимы все системы координат. Игнорируя тяготение, мы автоматически возвращаемся к инерциальной системе специальной теории относительности.

2. Ньютонов закон тяготения связывает движение тела здесь и теперь с действием другого тела в то же самое время на далеком расстоянии. Этот закон стал образцом для всего механистического мировоззрения. Но механистическое мировоззрение потерпело крах. В уравнениях Максвелла мы создали новый образец для законов природы. Уравнения Максвелла суть структурные законы. Они связывают события, которые происходят теперь и здесь, с событиями, которые происходят немного позднее и в непосредственном соседстве. Они суть законы, описывающие электромагнитное поле. Наши новые гравитационные уравнения суть также структурные законы, описывающие изменение поля тяготения. Схематически мы можем сказать: переход от ньютонова закона тяготения к общей относительности до некоторой степени аналогичен переходу от теории электрических жидкостей и закона Кулона к теории Максвелла.

3. Наш мир неевклидов. Геометрическая природа его образована массами и их скоростями. Гравитационные уравнения общей теории относительности стремятся раскрыть геометрические свойства нашего мира.

Предположим на минуту, что нам удалось последовательно выполнить программу общей теории относительности. Но не грозит ли нам опасность увлечения спекуляциями, слишком далекими от реальности? Мы знаем, как хорошо старая теория объясняет астрономические наблюдения. Можно ли построить мост между новой теорией и наблюдением? Каждое рассуждение должно про-



веряться экспериментом, и любые выводы, как бы привлекательны они ни были, должны отбрасываться, если не соответствуют фактам. Как выдержала новая теория тяготения экспериментальную проверку? Ответ на этот вопрос можно дать в следующем предложении: старая теория есть особый предельный случай новой. Если силы тяготения сравнительно слабы, прежний ньютонов закон оказывается хорошим приближением к новым законам тяготения. Таким образом, все наблюдения, подтверждающие классическую теорию, подтверждают и общую теорию относительности. Мы вновь приходим к старой теории от более высокого уровня новой.

Даже если бы нельзя было указать дополнительных наблюдений в пользу новой теории, если бы ее объяснения были лишь столь же хороши, как и объяснения старой теории, предоставляя тем самым свободный выбор между обеими теориями, мы должны были бы отдать предпочтение новой. Уравнения новой теории с формальной точки зрения сложнее, но их предпосылки, с точки зрения основных принципов, гораздо проще. Исчезли два страшных привидения — абсолютное время и инерциальная система. Чрезвычайно важная идея эквивалентности тяжелой и инертной масс не осталась без внимания. Не надо допущений, касающихся сил тяготения и их зависимости от расстояния. Уравнения тяготения имеют форму структурных законов, форму, которая требуется от всех физических законов со времени великих достижений теории поля.

Из новых гравитационных законов могут быть сделаны и новые выводы, не содержащиеся в законах тяготения Ньютона. Один вывод, а именно отклонение светового луча в поле тяготения, уже указывался. Приведем еще два других следствия.

Если старые законы вытекают из новых, когда силы тяготения слабы, то отклонения от ньютонова закона тяготения можно ожидать только для сравнительно больших сил тяготения. Возьмем нашу солнечную систему. Планеты, и среди них наша Земля, движутся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца. Меркурий — планета, наиболее близкая к Солнцу. Притяжение между Солнцем и Меркурием сильнее, чем между Солнцем и любой другой планетой, так как расстояние его от Солнца меньше. Если имеется

какая-либо надежда найти отклонение от закона Ньютона, то наибольший шанс — движение Меркурия. Из классической теории следует, что путь, описываемый Меркурием, того же вида, как и путь любой другой планеты, и отличается лишь тем, что он ближе к Солнцу. Согласно общей теории относительности движение должно немного отличаться. Не только Меркурий должен вращаться вокруг Солнца, но и эллипс, который он описывает, должен очень медленно вращаться относительно системы координат, связанной с Солнцем (рис. 69). Это вращение эллипса выражает новый эффект общей теории относительности. Новая теория предсказывает величину этого эффекта. Эллипс Меркурия осуществлял бы полное вращение в три миллиона лет! Мы видим, как незначителен этот эффект и как безнадежно было бы искать его в отношении планет, обращающихся на более далеком расстоянии от Солнца.

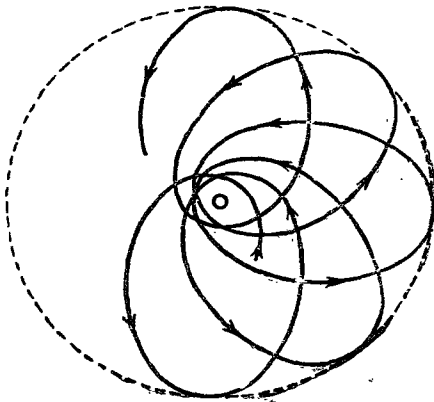


Рис. 69.

Отклонение орбиты планеты Меркурий от эллиптической было известно прежде, чем была сформулирована общая теория относительности, но никакого объяснения этому нельзя было найти. С другой стороны, общая теория относительности развивалась без всякого внимания к этой специальной проблеме. Заключение о вращении эллипса при движении планеты вокруг Солнца было сделано позднее из новых гравитационных уравнений. Теория успешно объяснила отклонение действительно происходящего движения Меркурия от движения, предписываемого законом Ньютона.

Но существует еще одно заключение, которое было сделано из общей теории относительности и сравнено с опытом. Мы уже видели, что ритм часов, помещенных на большой окружности вращающегося диска, отличен от ритма часов, помещенных на меньшем круге. Аналогично,

Но существует еще одно заключение, которое было сделано из общей теории относительности и сравнено с опытом. Мы уже видели, что ритм часов, помещенных на большой окружности вращающегося диска, отличен от ритма часов, помещенных на меньшем круге. Аналогично,

из теории относительности следует, что ритм часов, помещенных на Солнце, отличался бы от ритма часов, помещенных на Земле, так как влияние поля тяготения гораздо сильнее на Солнце, чем на Земле.

Мы заметили на стр. 83, что натрий, когда он раскален, испускает однородный желтый свет определенной длины волны. В этом излучении атом обнаруживает один из своих ритмов; атом представляет собой, так сказать часы, а излученная длина волны — один из его ритмов. Согласно общей теории относительности длина волны света, излученного атомом натрия, скажем, помещенного на Солнце, должна быть несколько больше, чем длина волны света, излученного атомом натрия на нашей Земле.

Проблема проверки следствий общей теории относительности путем наблюдений сложна и точно никоим образом не решена. Поскольку мы интересуемся принципиальными идеями, мы не хотим входить в этот предмет глубже, а только устанавливаем, что пока приговор эксперимента, по-видимому, таков: подтвердить выводы, сделанные из общей теории относительности.

## ПОЛЕ И ВЕЩЕСТВО

Мы видели, как и почему механистическая точка зрения потерпела крах. Невозможно было объяснить все явления, предполагая, что между неизменными частицами действуют простые силы. Первые попытки отойти от механистического взгляда и ввести понятия поля оказались наиболее успешными в области электромагнитных явлений. Были сформулированы структурные законы для электромагнитного поля, — законы, связывающие события, смежные в пространстве и во времени. Эти законы соответствуют характеру специальной теории относительности, так как они инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца. Позднее общая теория относительности сформулировала законы тяготения. Они опять-таки являются структурными законами, описывающими поле тяготения между материальными частицами. Точно так же легко было обобщить уравнения Максвелла так, чтобы их

можно было применить в любой системе координат, аналогично законам тяготения общей теории относительности.

Мы имеем две реальности: *вещество и поле*. Несомненно, что в настоящее время мы не можем представить себе всю физику построенной на понятии вещества, как это делали физики в начале девятнадцатого столетия. В настоящее время мы принимаем оба понятия. Можем ли мы считать вещество и поле двумя различными, несходными реальностями? Пусть дана маленькая частица вещества; мы могли бы наивно представить себе, что имеется определенная поверхность частицы, за пределами которой ее уже нет, а появляется ее поле тяготения. В нашей картине область, в которой справедливы законы поля, резко отделена от области, в которой находится вещество. Но что является физическим критерием, различающим вещество и поле? Раньше, когда мы не знали теории относительности, мы пытались бы ответить на этот вопрос следующим образом: вещество имеет массу, в то время как поле ее не имеет. Поле представляет энергию, вещество представляет массу. Но мы уже знаем, что такой ответ в свете новых знаний недостаточен. Из теории относительности мы знаем, что вещество представляет собою огромные запасы энергии и что энергия представляет вещество. Мы не можем таким путем провести качественное различие между веществом и полем, так как различие между массой и энергией не качественное. Гораздо большая часть энергии сосредоточена в веществе, но поле, окружающее частицу, также представляет собой энергию, хотя и в несравненно меньшем количестве. Поэтому мы могли бы сказать: вещество — там, где концентрация энергии велика, поле — там, где концентрация энергии мала. Но если это так, то различие между веществом и полем скорее количественное, чем качественное. Нет смысла рассматривать вещество и поле как два качества, совершенно отличные друг от друга. Мы не можем представить себе определенную поверхность, ясно разделяющую поле и вещество.

Те же трудности вырастают для заряда и его поля. Кажется невозможным дать ясный качественный критерий для различения между веществом и полем или зарядом и полем.

Структурные законы, то есть законы Максвелла и гравитационные законы, нарушаются для очень большой концентрации энергии или, как мы можем сказать, они нарушаются там, где присутствуют источники поля, то есть электрические заряды или вещество. Но не можем ли мы слегка модифицировать наши уравнения так, чтобы они были справедливы всюду, даже в областях, где энергия колоссально сконцентрирована?

Мы не можем построить физику на основе только одного понятия — вещества. Но деление на вещество и поле, после признания эквивалентности массы и энергии, есть нечто искусственное и неясно определенное. Не можем ли мы отказаться от понятия вещества и построить чистую физику поля? То, что действует на наши чувства в виде вещества, есть на деле огромная концентрация энергии в сравнительно малом пространстве. Мы могли бы рассматривать вещество как такие области в пространстве, где поле чрезвычайно сильно. Таким путем можно было бы создать основы новой философии. Ее конечная цель состояла бы в объяснении всех событий в природе структурными законами, справедливыми всегда и всюду. С этой точки зрения брошенный камень есть изменяющееся поле, в котором состояния наибольшей интенсивности поля перемещаются в пространстве со скоростью камня. В нашей новой физике не было бы места и для поля, и для вещества, поскольку единственной реальностью было бы поле. Этот новый взгляд внушен огромными достижениями физики поля, успехом в выражении законов электричества, магнетизма, тяготения в форме структурных законов и, наконец, эквивалентностью массы и энергии. Нашей основной задачей было бы модифицировать законы поля таким образом, чтобы они не нарушались для областей, в которых энергия имеет колоссальную концентрацию.

Но до сих пор мы не имели успеха в последовательном и убедительном выполнении этой программы. Заключение о том, возможно ли ее выполнить — принадлежит будущему. В настоящее время во всех наших реальных теоретических построениях мы все еще должны допускать две реальности — поле и вещество.

Фундаментальные проблемы еще стоят перед нами. Мы знаем, что все вещество состоит лишь из частиц немногих

видов. Как различные формы вещества построены из этих элементарных частиц? Как эти элементарные частицы взаимодействуют с полем? Поиски ответа на эти вопросы привели к новым идеям в физике, идеям *квантовой теории*.

*Подведем итоги:*

*В физике появилось новое понятие, самое важное достижение со времени Ньютона: поле. Потребовалось большое научное воображение, чтобы уяснить себе, что не заряды и не частицы, а поле в пространстве между зарядами и частицами существенно для описания физических явлений. Понятие поля оказывается весьма удачным и приводит к формулированию уравнений Максвелла, описывающих структуру электромагнитного поля, управляющих электрическими, равно как и оптическими явлениями.*

*Теория относительности возникает из проблемы поля. Противоречия и непоследовательность старых теорий вынуждают нас приписывать новые свойства пространственно-временному континууму, этой арене, на которой разыгрываются все события нашего физического мира.*

*Теория относительности развивается двумя этапами. Первый этап приводит к так называемой специальной теории относительности, применяемой только к инерциальным системам координат, т. е. к системам, в которых справедлив закон инерции, как он был сформулирован Ньютоном. Специальная теория относительности основывается на двух фундаментальных положениях: физические законы одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга; скорость света всегда имеет одно и то же значение. Из этих положений, полностью подтвержденных экспериментом, выведены свойства движущихся стержней и часов, изменения их длины и ритма, зависящие от скорости. Теория относительности изменяет законы механики. Старые законы несправедливы, если скорость движущейся частицы приближается к скорости света. Новые законы движения тела, сформулированные теорией относительности, блестяще подтверждаются экспериментом. Дальнейшее следствие теории относительности (специальной) есть связь между массой и энергией. Масса — это энергия, а энергия имеет массу. Оба закона сохранения — закон сохранения*

*массы и закон сохранения энергии — объединяются теорией относительности в один закон, в закон сохранения массы-энергии.*

*Общая теория относительности дает еще более глубокий анализ пространственно-временного континуума. Справедливость теории относительности больше не ограничивается инерциальными системами координат. Теория берется за проблему тяготения и формулирует новые структурные законы для поля тяготения. Она заставляет нас проанализировать роль, которую играет геометрия в описании физического мира. Эквивалентность тяжелой и инертной масс она рассматривает как существенный, а не просто случайный факт, каким она была в классической механике. Экспериментальные следствия общей теории относительности лишь слегка отличаются от следствий классической механики. Они выдерживают экспериментальную проверку всюду, где возможно сравнение. Но сила теории заключается в ее внутренней согласованности и простоте ее основных положений.*

*Теория относительности подчеркивает важность понятия поля в физике. Но нам еще не удалось сформулировать чистую физику поля. В настоящее время мы должны еще предполагать существование и поля, и вещества.*

## IV. КВАНТЫ

---

*Непрерывность — прерывность. — Элементарные кванты вещества и электричества. — Кванты света. — Световые спектры. — Волны вещества. — Волны вероятности. — Физика и реальность.*

### НЕПРЕРЫВНОСТЬ — ПРЕРЫВНОСТЬ

Перед нами раскрыта карта города Нью-Йорка и окружающей его местности. Мы спрашиваем: какие пункты на этой карте можно достичь поездом? Просмотрев эти пункты в железнодорожном расписании, мы отмечаем их на карте. Затем мы изменяем вопрос и спрашиваем: какие пункты можно достичь автомобилем? Если мы нарисуем на карте линии, представляющие все дороги, начинающиеся в Нью-Йорке, то любой пункт, лежащий на этих дорогах, практически можно достичь автомобилем. В обоих случаях мы имеем ряд точек. В первом случае они отделены друг от друга и представляют собой различные железнодорожные станции, а во втором они суть точки вдоль шоссеиных дорог. Следующий наш вопрос — о расстоянии до каждой из этих точек от Нью-Йорка или, для большей точности, от определенного места в этом городе. В первом случае точкам на карте соответствуют определенные числа. Эти числа изменяются нерегулярно, но всегда на конечную величину, скачком. Мы говорим: расстояния от Нью-Йорка до мест, которые можно достичь поездом, изменяются только *прерывно*. Однако расстояния до мест, которые можно достичь автомобилем, могут изменяться как угодно мало, они могут меняться *непрерывно*. Изменения расстояний можно сделать произвольно малыми в случае путешествия автомобилем, а не поездом.

Производство каменноугольных копей можно изменять непрерывным образом. Количество произведенного угля можно увеличивать или уменьшать произвольно малыми порциями. Но число работающих углекопов можно



изменять только прерывно. Было бы чистой бессмыслицей сказать: «Со вчерашнего дня число работающих увеличилось на 3,783».

Человек, которого спросили о количестве денег в его кармане, может назвать не любую, как угодно малую величину, а лишь величину, содержащую только два десятичных знака. Сумма денег может изменяться только скачками, прерывно. В Америке наименьшее возможное изменение или, как мы будем его называть, «элементарный квант» американских денег, есть один цент. Элементарный квант английских денег есть один фартинг, стоящий только половину американского элементарного кванта. Здесь мы имеем пример двух элементарных квантов, величину которых можно сравнивать друг с другом. Отношение их величин имеет определенный смысл, так как стоимость одного из них в два раза превышает стоимость другого.

Мы можем сказать: некоторые величины могут изменяться непрерывно, другие же могут изменяться только прерывно, порциями, которые уже нельзя дальше уменьшать. Эти неделимые порции называются *элементарными квантами* этих величин.

Мы можем взвешивать огромные количества песка и считать его массу непрерывной, хотя его зернистая структура очевидна. Но если бы песок стал очень драгоценным, а употребляемые весы очень чувствительными, мы должны были бы признать факт, что масса песка всегда изменяется на величину, кратную массе одной наименьшей частицы. Масса этой наименьшей частицы была бы нашим элементарным квантом. Из этого примера мы видим, как прерывный характер величины, до тех пор считавшейся непрерывной, обнаруживается благодаря увеличению точности наших измерений.

Если бы мы должны были характеризовать основные идеи квантовой теории в одном предложении, мы могли бы сказать: *следует предположить, что некоторые физические величины, до тех пор считавшиеся непрерывными, состоят из элементарных квантов.*

Область фактов, охватываемых квантовой теорией, чрезвычайно велика. Эти факты открыты благодаря высокому развитию техники современного эксперимента. Так

как мы не можем ни показать, ни описать даже основные эксперименты, мы часто должны будем приводить их результаты догматически. Наша цель — объяснить лишь принципиальные, основные идеи.

#### ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ КВАНТЫ ВЕЩЕСТВА И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В картине строения вещества, нарисованной кинетической теорией, все элементы построены из молекул. Возьмем простейший пример наиболее легкого элемента — водорода. Мы видели (см. стр. 56), как изучение броуновского движения привело к определению массы молекулы водорода. Она равна

0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 грамма.

Это означает, что масса прерывна. Масса взятой порции водорода может изменяться лишь на целое число наименьших порций, каждая из которых соответствует массе одной молекулы водорода. Но химические процессы показали, что молекула водорода может быть разбита на две части или, другими словами, что молекула водорода состоит из двух атомов. В химическом процессе роль элементарного кванта играет атом, а не молекула. Деля вышеуказанное число на два, мы находим массу атома водорода; она равна приблизительно

0,000 000 000 000 000 000 000 001 7 грамма.

Масса является величиной прерывной. Но, конечно, нам не следует беспокоиться об этом при обычном определении геса тела. Даже наиболее чувствительные весы далеки от достижения такой степени точности, которая позволяла бы обнаружить прерывное изменение массы тела.

Но вернемся к хорошо известному факту. Проводник связан с источником тока. Ток течет по проводнику от высшего потенциала к низшему. Мы помним, что многие экспериментальные факты были объяснены простой теорией электрических жидкостей, текущих по проводнику. Мы помним также (стр. 67), что вопрос о том, положительная ли жидкость течет от высшего потенциала к низшему или же отрицательная жидкость течет от низшего потенциала к

высшему, был делом только соглашения. Пренебрежем на минуту всем последующим прогрессом, вытекающим из понятия поля. Даже если мы будем рассуждать в рамках простой терминологии теории электрических жидкостей, все еще остается ряд вопросов, требующих разрешения. Как указывает само название «жидкость», электричество в прежнее время рассматривалось как непрерывная величина. Согласно этим старым взглядам величина заряда могла изменяться произвольно малыми частями. Не было необходимости предполагать наличие элементарных электрических квантов. Достижения кинетической теории материи подготовили нас к новому вопросу: существуют ли элементарные кванты электрических жидкостей? Следующий вопрос, который следует поставить, это вопрос о том, состоит ли электрический ток из потока положительных или отрицательных жидкостей или же представляет собой поток тех и других?

Идея всех экспериментов, которые должны дать ответ на эти вопросы, состоит в том, чтобы выделить электрическую жидкость из проводника, заставить ее проходить через пустое пространство, лишить ее какой-либо связи с веществом, а затем исследовать ее свойства, которые при этих условиях должны обнаруживаться яснее.

Многие эксперименты этого рода были осуществлены в конце девятнадцатого столетия. Прежде чем объяснить идею экспериментальной техники, по крайней мере в одном случае, мы приведем конечные результаты. Электрическая жидкость, текущая через проводник, отрицательна, и стало быть, направление ее движения — от низшего потенциала к высшему. Если бы это было известно с самого начала, когда впервые была создана теория электрических жидкостей, мы, конечно, переменили бы термины и назвали бы электричество каучуковой палочки положительным, а электричество стеклянной палочки отрицательным. В таком случае было бы удобнее жидкость, текущую по проводнику, считать положительной. Но так как наше первоначальное предположение было ошибочным, то теперь мы должны нести бремя неудобной терминологии.

Следующий важный вопрос: является ли структура этой отрицательной жидкости «зернистой» или иначе: не состоит ли она из электрических квантов? И снова множе-

ство независимых друг от друга экспериментов показывают, что нет никакого сомнения в существовании элементарных квантов этого отрицательного электричества. Отрицательная электрическая жидкость состоит из зерен, подобно тому как пляж состоит из отдельных песчинок или как дом построен из отдельных кирпичей. Этот результат наиболее ясно был сформулирован Дж. Дж. Томсоном около сорока лет назад. Элементарные кванты отрицательного электричества называются *электронами*. Каждый отрицательный электрический заряд состоит из множества элементарных зарядов — электронов. Отрицательный за-

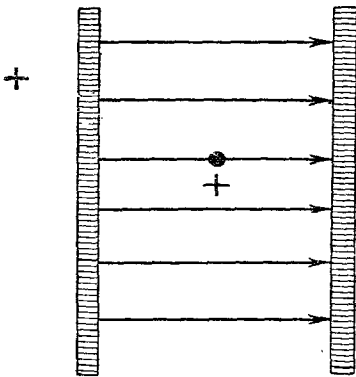


Рис. 70.

ряд, как и масса, может быть только прерывным. Однако элементарный электрический заряд настолько мал, что во многих исследованиях одинаково возможно, а иногда даже и более удобно, считать его непрерывной величиной. Таким образом, атомная и электронная теории вводят в науку прерывные физические величины, которые могут изменяться только скачками.

Представим себе две параллельные металлические пластинки, помещенные в пространство, из которого весь воздух удален. Одна пластинка заряжена положительно, другая — отрицательно (рис. 70). Пробный положительный заряд, помещенный между двумя пластинками, будет отталкиваться положительно заряженной пластинкой и притягиваться отрицательно заряженной. Таким образом, силовые линии будут направлены от положительно заряженной пластинки к отрицательно заряженной. Сила, действующая на отрицательно заряженное пробное тело, имела бы противоположное направление. Если пластинки достаточно велики, силовые линии между ними будут расположены повсюду одинаково плотно. Независимо от того, где помещается пробное тело, сила, а стало быть, и плотность силовых линий будут одинаковыми. Электроны,

помещенные где-либо между пластинами, вели бы себя подобно дождевым каплям в поле тяготения Земли, двигаясь параллельно друг другу от отрицательно заряженной пластинки к положительно заряженной. Существует много известных экспериментальных способов для создания ливня электронов в таком поле, которое всех их направляет в одну сторону. Один из наиболее простых способов — это поместить раскаленную проволоку между заряженными пластинками. Такая раскаленная проволока испускает электроны, которые затем направляются силовыми линиями внешнего поля. На этом принципе построены, например, всем известные радиолампы.

С пучком электронов произведено много очень остроумных экспериментов. Исследовано изменение их траектории в различных электрических и магнитных внешних полях. Был даже изолирован отдельный электрон и определены его заряд и масса, т. е. его инерциальное сопротивление действию внешней силы. Здесь мы укажем только на величину массы электрона. Оказалось, что она примерно в *две тысячи раз меньше*, чем масса атома водорода. Таким образом, масса атома водорода, как она ни мала, оказывается большой в сравнении с массой электрона. С точки зрения последовательной теории поля вся масса электрона, т. е. вся его энергия, есть энергия его поля; большая часть энергии поля сосредоточена внутри очень небольшой сферы, а дальше от «центра» электрона поле весьма мало.

Мы говорили раньше, что атом какого-либо элемента является его наименьшим элементарным квантом. В этом были убеждены очень долгое время. Однако теперь так уже не думают! Наука сформировала новый взгляд, показывающий пределы старого. Едва ли какое-либо утверждение в физике более твердо обосновано фактами, чем утверждение о сложной структуре атомов. Сначала пришло подтверждение, что электрон — элементарный квант отрицательной электрической жидкости — есть также один из составных элементов атома, один из элементарных кирпичей, из которых построено все вещество. Приведенный раньше пример с раскаленной проволокой, испускающей электроны, есть только один из бесчисленных примеров извлечения этих частиц из вещества. Этот результат, тесно связывающий проблему структуры вещества со

структурой электричества, вытекает, вне всякого сомнения, из очень многих независимых экспериментальных фактов.

Извлечь из атома электроны, которые в нем находятся, сравнительно легко. Это можно сделать нагреванием, как в нашем примере с раскаленной проволокой, или другим путем, например бомбардировкой атомов другими электронами.

Представим себе, что тонкая, докрасна раскаленная металлическая проволока помещена в разреженный водород. Проволока будет испускать электроны во всех направлениях. Действием внешнего электрического поля им будет сообщена определенная скорость. Электрон увеличивает свою скорость подобно камню, падающему в поле тяготения. Этим методом можно получить пучок электронов, движущихся в определенном направлении с определенной скоростью. Подвергая электроны действию очень сильных полей, мы можем в наше время достигнуть скоростей, сравнимых со скоростью света. Что же случится, если пучок электронов с определенной скоростью ударится о молекулу разреженного водорода? Удар достаточно быстрого электрона не только разобьет молекулу водорода на два ее атома, но и вырвет электрон из одного из этих атомов.

Примем как факт, что электроны суть составные части вещества. В таком случае атом, из которого выбит электрон, не может быть электрически нейтральным. Если он раньше был нейтральным, то он не может быть нейтральным теперь, так как он стал беднее одним элементарным зарядом. То, что осталось, должно иметь положительный заряд. Более того, так как масса электрона гораздо меньше массы легчайшего атома, мы с уверенностью можем заключить, что гораздо большая часть массы атома представлена не электронами, а остающимися элементарными частицами, значительно более тяжелыми, чем электроны. Мы называем эту тяжелую часть атома его *ядром*.

Современная экспериментальная физика разработала методы разбиения атомных ядер, превращения атомов одного элемента в атомы другого и вырывания из ядер тяжелых элементарных частиц, из которых ядра состоят. Этот раздел физики, известный под названием «физики ядра», развитию которой много содействовал Резерфорд, с экспериментальной точки зрения является наиболее интересным. Но в на-

стоящее время все еще нет простой по своим основным идеям теории, которая объединяла бы богатое разнообразие фактов в области ядерной физики. Так как в этой книге мы интересуемся только общими идеями физики, мы опустим этот раздел, несмотря на его огромную важность в современной физике.

## К В А Н Т Ы   С В Е Т А

Рассмотрим стенку, построенную вдоль морского берега. Морские волны непрерывно ударяются о стенку, каждый раз что-то смывая с ее поверхности, и отступают, предоставляя свободный путь для приходящих волн. Масса стенки уменьшается, и мы можем спросить, как велика часть, смываемая, скажем, за год. А теперь нарисуем другой процесс. Мы хотим уменьшить массу стенки на то же самое количество, как и раньше, но другим путем. Мы стреляем в стенку, разбивая ее в тех местах, куда попадают пули. Масса стенки будет уменьшаться, и мы легко можем представить себе, что в обоих случаях достигается одно и то же уменьшение массы. Но по виду стенки мы легко могли бы обнаружить, действовали ли на стенку непрерывные морские волны или прерывный ливень пуль. Для понимания явлений, которые мы здесь описываем, полезно учесть это различие между морскими волнами и ливнем пуль.

Мы указывали раньше, что раскаленная проволока испускает электроны. Здесь мы введем другой путь выбивания электронов из металла. Пусть на металлическую поверхность падает однородный свет, например фиолетовый, имеющий, как мы знаем, определенную длину волны. Свет выбивает из металла электроны. Электроны вырываются из металла и ливень их устремляется вперед с определенной скоростью. Основываясь на законе сохранения энергии, мы можем сказать: энергия света частично превращается в кинетическую энергию вырванных электронов. Современная экспериментальная техника позволяет нам подсчитать число этих электронов-снарядов, определить их скорость, а стало быть, их энергию. Это вырывание электронов падающим на металл светом называется *фотоэлектрическим эффектом*.

Мы рассматриваем действие однородной световой волны с некоторой определенной интенсивностью. Как и в каждом эксперименте, мы должны теперь изменять условия эксперимента, чтобы посмотреть, будет ли это иметь какое-либо влияние на рассматриваемый эффект.

Начнем с изменения интенсивности однородного фиолетового света, падающего на металлическую пластинку, и заметим, в какой степени энергия испускаемых электронов зависит от интенсивности света. Попробуем найти ответ с помощью рассуждения, а не эксперимента. Мы могли бы рассуждать так: в фотоэлектрическом эффекте известная определенная порция энергии излучения превращается в энергию движения электронов. Если мы снова осветим металл светом той же длины волны, но от более мощного источника, то энергия испускаемых электронов должна быть больше, так как излучение богаче энергией. Поэтому мы должны ожидать, что скорость испускаемых электронов возрастет, если возрастет интенсивность света. Но эксперимент противоречит нашему предсказанию. Мы еще раз видим, что законы природы не таковы, какими мы хотели бы их видеть. Мы столкнулись с одним из экспериментов, который противоречит нашим предсказаниям и тем самым разбивает теорию, на которой они основывались. С точки зрения волновой теории результат реального эксперимента удивителен. Все наблюдаемые электроны имеют одинаковую скорость, одинаковую энергию, которая не изменяется при возрастании интенсивности света.

Волновая теория не могла предсказать результат эксперимента. Здесь опять новая теория возникает из конфликта старой теории с экспериментом.

Будем намеренно несправедливы к волновой теории света, забывая ее великие достижения, ее блестящее объяснение изгибания луча около весьма малых препятствий (дифракция света). Сосредоточив внимание на фотоэлектрическом эффекте, потребуем от волновой теории соответствующего объяснения его. Очевидно, что из волновой теории мы не можем вывести независимость энергии электронов от интенсивности света, которым они извлекаются из металлической пластинки. Поэтому мы испробуем другую теорию. Вспомним, что корпускулярная теория Ньютона, объяснившая многие наблюдаемые явления, потерпела



крах при объяснении дифракции света — явления, которым мы сейчас намеренно пренебрегаем. Во времена Ньютона понятия энергии не существовало. По Ньютону световые корпускулы были невесомы. Каждый цвет сохранял свой собственный субстанциональный характер. Позднее, когда было создано понятие энергии и признано, что свет несет энергию, никто не думал применять эти понятия к корпускулярной теории света. Теория Ньютона умерла и до нашего века о ее возрождении никто серьезно не помышлял.

Чтобы сохранить принципиальную идею теории Ньютона, мы должны предположить, что однородный свет состоит из зерен энергии, и заменить старые световые корпускулы световыми квантами, т. е. небольшими порциями энергии, несущимися в пустом пространстве со скоростью света. Мы будем называть эти световые кванты *фотонами*. Возрождение теории Ньютона в этой новой форме приводит к *квантовой теории света*. Не только вещество и электрический заряд, но и энергия излучения имеет зернистую структуру, т. е. состоит из световых квантов. Наряду с квантами вещества и квантами электричества существуют так же и кванты энергии.

Идея квантов энергии была впервые высказана Планком в начале этого столетия для того, чтобы объяснить некоторые эффекты гораздо более сложного характера, чем фотоэлектрический. Но фотоэффект яснее и проще показывает необходимость изменения наших старых понятий.

Сразу ясно, что квантовая теория света дает объяснение фотоэлектрическому эффекту. Поток фотонов падает на металлическую пластинку. Взаимодействие между излучением и веществом состоит здесь из очень многих элементарных процессов, в которых фотон ударяется об атом и выбивает из него электрон. Эти элементарные процессы подобны друг другу, и вырванный электрон будет в каждом случае иметь одинаковую энергию. Нам становится понятным, что увеличение интенсивности света на нашем новом языке означает увеличение числа падающих фотонов. В этом случае из металлической пластинки было бы вырвано большее число электронов, но энергия каждого отдельного электрона не изменилась бы. Итак, мы видим,

что эта теория находится в полном согласии с результатами наблюдения.

Что произойдет, если пучок однородного света другого цвета, скажем красного вместо фиолетового, упадет на металлическую поверхность? Предоставим эксперименту ответить на этот вопрос. Энергию испускаемых электронов можно измерить и сравнить с энергией электронов, выбиваемых фиолетовым светом. Энергия электронов, выбиваемая красным светом, оказывается меньшей, чем энергия электронов, вырываемых фиолетовым светом. Это означает, что энергия световых квантов различна для лучей различных цветов. Энергия фотонов красного луча вдвое меньше энергии фотонов фиолетового луча. Или, более строго: энергия светового кванта однородного луча уменьшается пропорционально увеличению длины волны. Это — существенное различие между квантом энергии и квантом электричества. Световые кванты различны для каждой длины волны, между тем как кванты электричества всегда одинаковы. Если бы мы захотели применить одну из наших прежних аналогий, мы сравнили бы световой квант с наименьшим квантом денег, который для каждой страны различен.

Продолжим критику волновой теории света и предположим, что структура света зерниста и образована световыми квантами, т. е. фотонами, проносющимися через пространство со скоростью света. Таким образом, в нашей новой картине свет есть ливень фотонов, а фотон есть элементарный квант световой энергии. Однако, если волновая теория отбрасывается, понятие длины волны исчезает. Какое новое понятие занимает его место? Энергия световых квантов! Утверждения, выраженные в терминологии волновой теории, можно перевести в утверждения квантовой теории излучения. Например:

Т е р м и н о л о г и я  
в о л н о в о й т е о р и и

Однородный свет имеет определенную длину волны. Длина волны красного конца спектра вдвое больше длины волны фиолетового конца.

Т е р м и н о л о г и я  
к в а н т о в о й т е о р и и

Однородный свет состоит из фотонов определенной энергии. Энергия фотона для красного конца спектра вдвое меньше энергии фотона фиолетового конца.

Положение в физике можно подытожить следующим образом: существуют явления, которые можно объяснить только квантовой теорией, а не волновой. Примером такого явления служит фотоэффект; известны и другие примеры того же рода. Существуют явления, которые можно объяснить только волновой теорией, а не квантовой. Типичным примером является дифракция света. Наконец, существуют явления, которые можно одинаково хорошо объяснить как квантовой, так и волновой теориями света, например прямолинейность распространения света.

Но что такое свет в действительности? Волна или ливень фотонов? Мы уже задавали раньше аналогичный вопрос: что такое свет — волна или ливень световых корпускул? В то время было полное основание отбросить корпускулярную теорию и принять волновую, объяснявшую все явления. Однако теперь проблема гораздо сложнее. По-видимому, нет никаких шансов последовательно описать световые явления, выбрав только какую-либо одну из двух возможных теорий. Положение таково, что мы должны применять иногда одну теорию, а иногда другую, а время от времени и ту и другую. Мы встретились с трудностью нового рода. Налицо две противоречивые картины реальности, но ни одна из них в отдельности не объясняет всех световых явлений, а совместно они их объясняют!

Как возможно соединить обе эти картины? Как понять обе эти совершенно различные стороны света? Не легко разрешить эту новую трудность. Опять мы встречаемся с фундаментальными проблемами.

Примем сейчас фотонную теорию света и постараемся с ее помощью понять факты, до сих пор объяснявшиеся волновой теорией. Этим самым мы подчеркнем трудности, которые на первый взгляд делают обе теории несовместимыми.

Как мы помним, луч однородного света, проходящий через маленькое отверстие, образует светлые и темные кольца (стр. 95). Как понять это явление с точки зрения квантовой теории света? Пусть фотон проходит через отверстие. Мы могли бы ожидать, что экран должен оказаться светлым, если фотон проходит сквозь отверстие, и темным, если он не проходит. Вместо этого мы обнаруживаем светлые и темные кольца. Мы могли бы попробовать рассуж-

дать следующим образом: возможно, что между краем отверстия и фотоном существует некоторое взаимодействие, которое и служит причиной появления дифракционных колец. Конечно, это положение едва ли можно признать за объяснение. В лучшем случае оно намечает программу объяснения, создавая по крайней мере некоторую надежду объяснения дифракции в будущем через взаимодействие вещества и фотонов.

Но даже эта слабая надежда разбивается нашим прежним обсуждением других экспериментальных фактов. Возьмем два маленьких отверстия. Однородный свет, проходя через оба отверстия, образует на экране светлые и темные полосы. Как следует понимать этот эффект с точки зрения квантовой теории света? Мы могли бы рассуждать так: фотон проходит сквозь какое-либо одно из отверстий. Если фотон однородного света представляет собой элементарную световую частицу, мы едва ли можем представить себе, как он может разделиться и пройти сквозь оба отверстия. Но в таком случае эффект должен бы быть совершенно таким же, как и в первом случае: светлые и темные кольца, а не светлые и темные полосы. Почему же наличие второго отверстия совершенно изменяет эффект? Очевидно, отверстие, сквозь которое фотон не проходит, даже если оно находится на большом расстоянии от другого, изменяет кольца в полосы. Если фотон ведет себя подобно корпускуле в классической физике, он должен пройти только через одно из двух отверстий. Но в этом случае явления дифракции кажутся совершенно непонятными.

Наука вынуждает нас создавать новые понятия, новые теории. Их задача — разрушить стену противоречий, которая часто преграждает дорогу научному прогрессу. Все существенные идеи в науке родились в драматическом конфликте между реальностью и нашими попытками ее понять. Здесь мы снова имеем дело с проблемой, для решения которой нужны новые принципы. Прежде чем мы рассмотрим попытки современной физики объяснить противоречие между квантовым и волновым аспектом света, мы покажем, что те же самые трудности возникают и в том случае, когда мы имеем дело с квантами вещества вместо квантов света.

## С В Е Т О В Ы Е   С П Е К Т Р Ы

Мы уже знаем, что все вещество состоит из частиц, число разновидностей которых невелико. Электроны были теми элементарными частицами вещества, которые были открыты первыми. Но электроны являются также и элементарными квантами отрицательного электричества. Кроме того, мы узнали, что некоторые явления вынуждают нас предположить, что и свет состоит из элементарных световых квантов, различных для различных длин волн. Прежде чем идти дальше, мы должны рассмотреть некоторые физические явления, в которых наряду с излучением существенную роль играет вещество.

Солнце испускает излучение, которое можно с помощью призмы разложить на составные части. Таким образом, можно получить непрерывный спектр Солнца. Между обоими концами видимого спектра представлена любая из промежуточных длин волн. Возьмем другой пример. Раньше уже было упомянуто, что раскаленный натрий испускает однородный свет, свет одного цвета или одной длины волны. Если раскаленный натрий поместить перед призмой, то мы увидим только одну желтую линию. Вообще же, если излучающее тело поместить перед призмой, то свет, который оно испускает, разбивается на его составные части и дает спектр, характерный лишь для данного излучающего тела.

Разряд электричества в трубке, наполненной газом, создает источник света, подобный тому, какой мы видим в неоновых трубках, употребляемых для световых реклам. Представим себе, что такая трубка помещена перед спектроскопом. Спектроскоп — это прибор, который действует аналогично призме, но с гораздо большей точностью и чувствительностью; он разлагает свет на его компоненты (составные лучи), т. е. он анализирует свет. Солнечный свет, видимый в спектроскопе, дает непрерывный спектр; в нем представлены все длины волн. Однако, если источником света является газ, сквозь который проходит электрический ток, характер спектра будет другой. Вместо непрерывного многоцветного изображения солнечного спектра теперь на непрерывном темном фоне появляются отдельные светлые полоски или линии. Каждая линия, если

она достаточно узка, соответствует определенному цвету или, говоря языком волновой теории, определенной длине волны. Например, если в спектре видны двадцать линий, то каждая из них будет обозначаться одним из двадцати чисел, выражающих соответствующие длины волн. Пары различных элементов обладают различными системами линий и, стало быть, различными комбинациями чисел, обозначающих длины волн, из которых состоит излучаемый спектр. Не существует двух таких элементов, которые имели бы идентичные системы полос в характеризующих их спектрах, так же как не существует двух таких людей, у которых были бы совершенно идентичные отпечатки пальцев. По мере того, как физики составляли каталог этих линий, постепенно становилось очевидным наличие законов и стало возможным столбики на вид не связанных между собой чисел, выражающих длины волн, связать единой простой математической формулой.

Все только что сказанное можно перевести на язык фотонов. Полосы соответствуют определенной длине волны или, другими словами, фотонам с определенной энергией. Следовательно, светящийся газ испускает фотоны, энергия которых является не какой угодно, а лишь характерной для данного вещества. Действительность опять ограничивает изобилие возможностей.

Атом данного элемента, скажем, водорода, может испускать только фотоны с определенной энергией. Возможно испускание лишь квантов с определенной энергией, испускание же всех других квантов запрещено. Представим себе, простоты ради, что некоторый элемент испускает только одну линию, т.е. фотоны с совершенно определенной энергией. Атом богаче энергией перед излучением и беднее после. Из принципа сохранения энергии следует, что *уровень энергии* атома выше перед излучением и ниже после и что разность между обоими уровнями должна быть равной энергии излученного фотона. Таким образом, тот факт, что атом определенного элемента испускает излучение лишь одной длины волны, т. е. фотоны лишь определенной энергии, можно выразить еще иначе: в атоме этого элемента возможны лишь два уровня энергии, и излучение фотона соответствует переходу атома с высшего уровня энергии на низший.

Но, как правило, в спектрах элементов оказывается линий больше, чем одна. Излученные фотоны соответствуют многим энергиям, а не только одной. Или, другими словами, мы должны предположить, что в атоме доступны многие уровни энергии и что испускание фотона соответствует переходу атома с более высокого уровня энергии на более низкий. Но существенно то, что не каждый уровень энергии дозволен, так как в спектре элемента оказывается не любая длина волны, не любой фотон какой угодно энергии. Вместо того, чтобы сказать, что спектру каждого атома принадлежат некоторые определенные линии, некоторые определенные длины волн, мы можем сказать, что каждый атом имеет некоторые определенные энергетические уровни и что испускание светового кванта связано с переходом атома от одного энергетического уровня к другому. Как правило, энергетические уровни не непрерывны, а дискретны. Мы снова видим, что возможности ограничены действительностью.

Бор был первым, кто показал, почему именно эти, а не другие линии оказываются в спектрах. Его теория, сформулированная двадцать пять лет назад, нарисовала картину строения атома, из которой, по крайней мере в простых случаях, можно рассчитать спектры элементов и, по виду несвязанные, скучные числа внезапно в свете теории сделать согласованными.

Теория Бора явилась промежуточной ступенью на пути к более глубокой и более общей теории, названной волновой или квантовой механикой. Мы хотим на этих последних страницах охарактеризовать принципиальные идеи этой теории. Прежде чем это сделать, мы должны еще напомнить теоретический и экспериментальный результат более специального характера.

Наш видимый спектр начинается с фиолетового цвета, соответствующего определенной длине волны, и кончается красным цветом, который также соответствует определенной длине волны. Или, другими словами, энергия фотонов видимого спектра всегда заключена внутри пределов, образованных энергиями фотонов фиолетового и красного света. Это ограничение есть, конечно, только свойство человеческого глаза. Если разность между какими-либо энергетическими уровнями достаточно велика, то испу-

скаться будет фотон *ультрафиолетового света*, давая линию за видимым спектром. Ее наличие нельзя обнаружить невооруженным глазом; необходимо применить фотографическую пластинку.

Рентгеновские лучи тоже состоят из фотонов гораздо большей энергии, чем энергия видимого света, или, другими словами, длина волны рентгеновских лучей гораздо меньше. Она в тысячи раз меньше, чем длина волны видимых лучей.

Но возможно ли определить экспериментально столь малую длину волны? Это довольно трудно было сделать даже для обычного света.

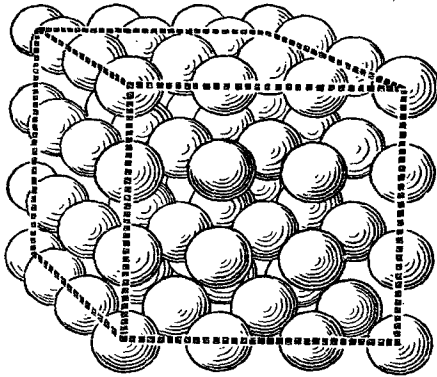


Рис. 71.

Мы должны были иметь малые препятствия или малые отверстия. Два булавочных отверстия, дающие дифракцию обычного света, очень близко расположены друг к другу; они должны быть в тысячи раз меньше и в тысячи раз плотнее расположены друг к другу, чтобы дать дифракцию рентгеновских лучей.

Как в таком случае можем мы измерить длину волны этих лучей? Сама природа приходит нам на помощь.

Кристалл есть конгломерат атомов, расположенных совершенно правильным образом на очень близких расстояниях друг от друга. Рисунок 71 показывает простую модель структуры кристалла. Вместо мелких отверстий здесь имеются крайне малые препятствия, образованные атомами элемента, расположенными очень тесно друг к другу и в абсолютно правильном порядке. Расстояния между атомами, как это найдено теорией, изучающей структуры кристаллов, так малы, что можно было ожидать получения эффекта дифракции рентгеновских лучей. Эксперимент подтвердил, что и в самом деле возможно получить дифракцию рентгеновских лучей с помощью этих тесно упакованных препятствий, расположенных в



правильной трехмерной решетке, встречающейся в кристалле.

Предположим, что пучок рентгеновских лучей падает на кристалл, а затем, пройдя сквозь него, регистрируется на фотографической пластинке. На пластинке в таком случае обнаруживается дифракционная картина. Чтобы изучить спектры рентгеновских лучей, чтобы из дифракционной картины вывести определенные заключения о длине волны, применялись различные методы. То, что здесь мы рассказали в нескольких словах, заполнило бы целые тома, если бы были изложены все теоретические и экспериментальные подробности. На фото (вклейка III) мы привели только одну дифракционную картину, полученную одним из разнообразных методов. Мы снова видим темные и светлые кольца, столь характерные для волновой теории. В центре виден след недифрагированного луча. Если бы между источником рентгеновских лучей и фотографической пластинкой не был помещен кристалл, то кроме этого следа на пластинке ничего не было бы видно. Из таких фотографий можно подсчитать длины волн рентгеновских спектров, а, с другой стороны, если длина волны известна, можно сделать заключение о структуре кристалла.

## ВОЛНЫ ВЕЩЕСТВА

Как истолковать тот факт, что в спектрах элементов оказываются лишь определенные характерные длины волн?

В физике часто случалось, что существенный успех был достигнут проведением последовательной аналогии между несвязанными по виду явлениями. В этой книге мы часто видели, как идеи, созданные и развитые в одной ветви науки, были впоследствии успешно применены в другой.

Развитие механистических взглядов и теории поля дает много примеров этого рода. Связывание разрешенных проблем с проблемами неразрешенными, внушая новые идеи, может пролить новый свет на наши трудности. Легко найти поверхностную аналогию, которая в действительности ничего не выражает. Но вскрыть некоторые общие существенные черты, скрытые под поверхностью внешних различий, создать на этой базе новую удачную теорию, это важная созидательная работа. Развитие так называемой волновой

механики, которое началось с работ де-Бройля и Шредингера около пятнадцати лет тому назад, является типичным примером достижений прогрессирующей теории, полученной путем глубоких и удачных аналогий.

Наш исходный пункт — это классический пример, ничего общего не имеющий с современной физикой. Возьмем в руки конец очень длинной гибкой резиновой трубки или пружины и будем двигать его ритмично вверх и вниз так, чтобы конец колебался. Тогда, как мы видели из многих других примеров, колебанием создается волна, распространяющаяся по трубке с определенной скоростью (рис. 72). Если мы представим себе бесконечно длинную трубку,



Рис. 72.

то группы волн, однажды отправленные, будут следовать в своем бесконечном путешествии без интерференции.

Возьмем теперь другой пример. Оба конца той же самой трубки закреплены. Если угодно, можно использовать скрипичную струну. Что происходит теперь, когда на одном конце резиновой трубки или струны создается волна? Волна, как и в предыдущем случае, начнет свое путешествие, но она скоро отразится от другого конца трубки. Теперь мы имеем две волны: одну, созданную колебанием, и другую, созданную отражением; они движутся в противоположных направлениях и интерферируют друг с другом. Нетрудно было бы проследить интерференцию обеих волн и определить характер волны, образующейся из их сложения; она называется *стоячей волной*. Оба слова, «стоячая» и «волна», кажутся противоречащими друг другу; тем не менее их комбинация оправдывается результатом наложения обеих волн.

Простейшим примером стоячей волны является движение струны с двумя закрепленными концами, вверх и вниз, как показано на рисунке 73. Это движение есть результат того, что одна волна накладывается на другую, когда обе они проходят в различных направлениях. Характерная

черта этого движения состоит в том, что в покое остаются только две конечные точки. Они называются *узлами*. Волна, так сказать, устанавливается между двумя узлами, все точки струны одновременно достигают максимума и минимума своих отклонений.

Но это только простейший вид стоячих волн. Существуют и другие. Например, стоячая волна может иметь и три узла, — по одному на каждом конце и один в середине. В этом случае в покое всегда остаются три точки. Из рисунка 74 сразу же видно, что здесь длина волны вдвое меньше длины волны в примере с двумя узлами. Аналогично стоячие волны могут иметь четыре (рис. 75), пять и более узлов. В каждом случае длина волны будет зависеть

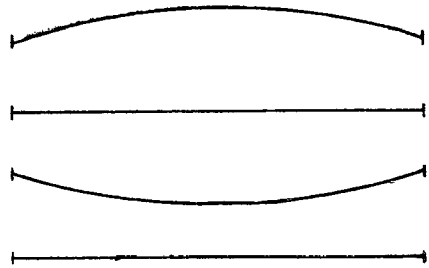


Рис. 73.

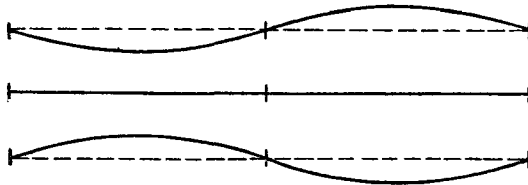


Рис. 74.

от числа узлов. Это число может быть только целым и может изменяться только скачками. Предложение вроде



Рис. 75.

«число узлов в стоячей волне равно 3,576» есть чистая бессмыслица. Таким образом, длина волны может изменяться только разрывно (дискретно). Здесь, в этой классической проблеме, мы узнаем знакомые черты квантовой теории. Стоячая волна, созданная скрипачом, фактически еще

более сложна, будучи смесью очень многих волн с двумя, тремя, четырьмя, пятью и более узлами, а стало быть, смесью различных длин волн. Физика может разложить такую смесь на простые стоячие волны, из которых она составлена. Или, употребляя нашу прежнюю терминологию, мы можем сказать, что колеблющаяся струна имеет свой спектр, так же как и элемент, испускающий излучение. И так же, как и в случае спектра элемента, здесь разрешены лишь известные длины волн, все же другие запрещены.

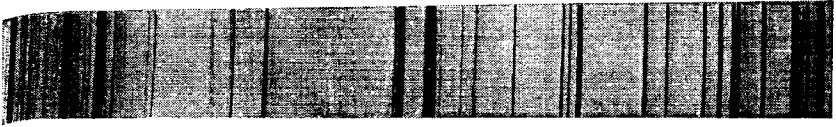
Таким образом, мы открыли некоторое подобие между колебанием струны и атомом, испускающим излучение. Странно, как может иметь место эта аналогия, но сделаем дальнейшее заключение из нее и попробуем продолжить сравнение, раз уж мы начали его.

Атом каждого элемента состоит из элементарных частиц: из тяжелых, составляющих ядро, и из легких — электронов. Такая система частиц ведет себя подобно маленькому акустическому инструменту, в котором производятся стоячие волны.

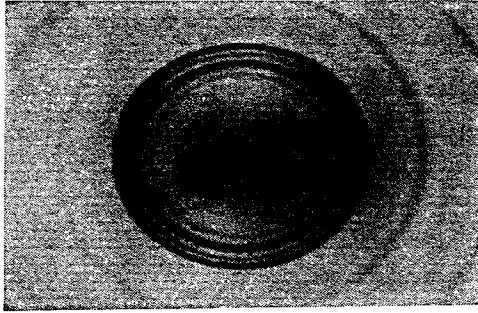
Однако стоячая волна является результатом интерференции двух или более движущихся волн. Если в нашей аналогии есть некоторая доля правды, то распространяющейся волне должна соответствовать еще более простая структура, чем структура атома. Что же имеет наиболее простую структуру? В нашем вещественном мире ничто не может быть более простым, чем электрон, элементарная частица, на которую не действуют никакие силы, т.е. электрон, покоящийся или находящийся в прямолинейном и равномерном движении. Мы могли бы прибавить новое звено в цепи нашей аналогии: движущийся прямолинейно и равномерно электрон — волны определенной длины. Это была новая и смелая идея де Бройля.

Раньше было показано, что имеются как явления, в которых свет обнаруживает свой волновой характер, так и явления, в которых свет обнаруживает свой корпускулярный характер. Уже привыкнув к мысли, что свет есть волна, мы к своему удивлению обнаружили, что в некоторых случаях, например в фотоэлектрическом эффекте, свет ведет себя, как ливень фотонов. Для электронов мы имеем теперь как раз обратное положение. Мы приучили

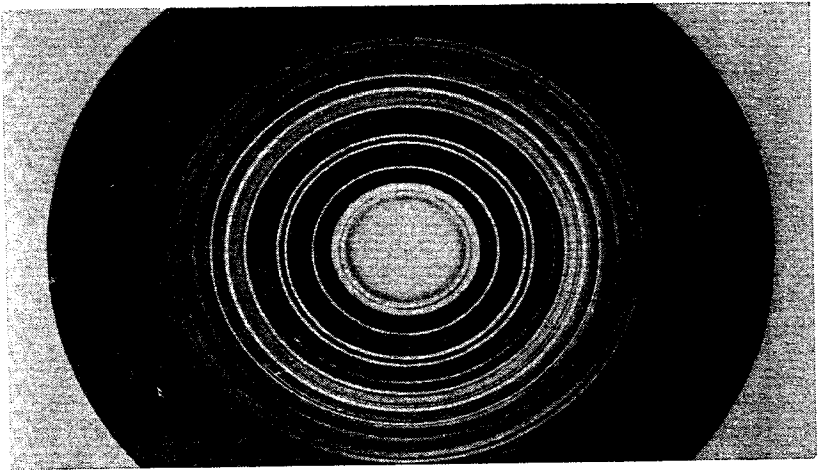
### ВКЛЕЙКА III



Спектральные линии. (Сфотографировано А. Шенстоном.)



Дифракция рентгеновских лучей.  
(Сфотографировано Ластовьевским  
и Грегор.)



Дифракция электронных волн. (Сфотографировано Лориа  
и Клингер.)



себя к мысли, что электроны — это частицы, элементарные кванты электричества и вещества. Были найдены их заряд и масса. Но если в идее де Бройля есть какая-либо правда, то должны быть такие явления, в которых вещество обнаруживает свой волновой характер. Этот вывод, полученный благодаря тому, что мы следовали акустической аналогии, кажется вначале странным и непонятным. Как может движущаяся корпускула иметь что-то общее с волной? Но такого рода трудности мы встречали в физике не раз. Те же проблемы мы встречали и в области световых явлений.

В создании физической теории существенную роль играют фундаментальные идеи. Физические книги полны сложных математических формул. Но началом каждой физической теории являются мысли и идеи, а не формулы. Идеи должны позднее принять математическую форму количественной теории, сделать возможным сравнение с экспериментом. Это можно объяснить на примере той проблемы, с которой мы теперь имеем дело. Главная догадка состоит в том, что равномерно движущийся электрон будет вести себя в некоторых явлениях аналогично волне. Предположим, что электрон или ливень электронов — при условии, что все они имеют одинаковую скорость, — движется равномерно. Масса, заряд и скорость каждого индивидуального электрона известны. Если мы хотим каким-нибудь образом связать понятие волны с равномерно движущимся электроном или электронами, то мы должны поставить следующий вопрос: а что такое длина волны? Это вопрос количественный, и, чтобы получить на него ответ, следует построить более или менее количественную теорию. Правда, это оказалось простым делом. Математическая простота работы де Бройля, дающей ответ на этот вопрос, чрезвычайно удивительна. В то время, когда была написана его работа, математическая техника других физических теорий была относительно очень утончена и сложна. Математические операции в задаче, касающейся волн вещества, чрезвычайно просты и элементарны, но ее фундаментальные идеи простираются глубоко и далеко.

Раньше, в случае световых волн и фотонов, было показано, что каждое положение, сформулированное на волновом

языке, можно перевести на язык фотонов или световых корпускул. То же самое справедливо и для электронных волн. Корпускулярный язык для равномерно движущихся электронов уже известен. Но каждое положение, выраженное корпускулярным языком, можно перевести на волновой язык, как это и было в случае фотонов. Две руководящие идеи привели к формулировке правил перевода. Одна идея — это аналогия между световыми волнами и электронными, или между фотонами и электронами. Мы применяем один и тот же метод перевода как для вещества, так и для света. Другую идею дает специальная теория относительности. Законы природы должны быть инвариантными относительно лоренцевых преобразований, а не классических. Обе эти идеи приводят к определению длины волны, соответствующей движущемуся электрону. Из теории следует, что электрон, движущийся, скажем, со скоростью 16 000 километров в секунду, имеет длину волны, которую легко можно подсчитать и которая, оказывается, лежит в той же области, что и длина волны рентгеновских лучей. Отсюда мы заключаем далее, что если можно обнаружить волновой характер вещества, то это можно сделать экспериментально таким же путем, каким обнаруживаются волновые свойства рентгеновских лучей.

Вообразим пучок электронов, движущихся равномерно с заданной скоростью, или, если употреблять волновую терминологию, однородную электронную волну и предположим, что она падает на очень тонкий кристалл, играющий роль дифракционной решетки. Расстояния между дифрагирующими элементами в кристалле настолько малы, что они могут создать дифракцию рентгеновских лучей. Можно ожидать аналогичный эффект и для электронных волн, имеющих длину волны того же порядка. Фотографическая пластина должна зарегистрировать эту дифракцию электронных волн, проходящих через тонкий слой кристалла. Эксперимент и в самом деле обнаруживает явление дифракции электронных волн, что, несомненно, является большим достижением теории. Подобие между дифракцией электронных волн и дифракцией рентгеновских лучей особенно заметно из сравнения фотографий (вклейка III).



Мы знаем, что такая картина позволяет нам определить длину волны рентгеновских лучей. Это остается в силе и для электронных волн. Дифракционная картина дает длину волны вещества, а полное количественное согласие теории и эксперимента блестяще подтверждает правильность наших рассуждений.

Эти результаты расширили и углубили наши прежние трудности. Это можно уяснить с помощью примера, аналогично примеру, использованному для световой волны. Электронный снаряд при очень малом отверстии будет отклоняться подобно световой волне. На фотографической пластинке обнаруживаются светлые и темные кольца. Есть некоторая надежда объяснить эти явления взаимодействием между электроном и краем отверстия, хотя такое объяснение не кажется очень многообещающим. Но что происходит в случае двух отверстий? Вместо колец появляются полосы. Почему же присутствие второго отверстия полностью изменяет эффект? Электрон неделим и может, казалось бы, пройти лишь через одно из двух отверстий. Как мог электрон, проходя через отверстие, знать, что на некотором расстоянии находится другое отверстие?

Раньше мы спрашивали: что такое свет? Является ли он ливнем корпускул или волной? Теперь мы спрашиваем: что такое вещество, что такое электрон? Частица ли он или волна? Электрон ведет себя подобно частице, когда он движется во внешнем электрическом или магнитном поле. Он ведет себя подобно волне, когда дифрагирует, проходя сквозь кристалл. С элементарным квантом вещества мы прошли через те же трудности, которые мы встретили, изучая кванты света.

Одним из наиболее фундаментальных вопросов, поставленных современными успехами науки, является вопрос о том, как согласовать два противоречивых взгляда на вещество и волну. Это одна из тех фундаментальных трудностей, которые, раз уж они сформулированы, должны привести, хотя и длинным путем, к прогрессу науки. Физика старалась разрешить эту проблему. Будущее покажет, является ли решение, подсказанное современной физикой, окончательным или же временным.

## ВОЛНЫ ВЕРОЯТНОСТИ

Согласно классической механике, если мы знаем положение и скорость данной материальной точки, а также и внешние действующие силы, то мы можем предсказать на основе законов механики весь ее будущий путь. В классической механике утверждение: «материальная точка имеет такие-то координаты и скорость в такой-то момент» имеет вполне определенный смысл. Если бы это утверждение потеряло свой смысл, то наши рассуждения (стр. 29) о предсказании будущего пути были бы ошибочны.

В начале девятнадцатого столетия ученые хотели свести всю физику к простым силам, действующим на частицы вещества, обладающие определенными координатами и скоростями в некоторый момент времени. Вспомним, как мы описывали движение, когда рассматривали механику в начале нашего путешествия по царству физических проблем. Мы нарисовали точки вдоль определенного пути, показывающие точные положения тела в определенные моменты времени, а затем провели векторы, показывающие направления и величины скоростей. Это было просто и убедительно. Но это нельзя повторить для элементарных квантов вещества — для электронов или для квантов энергии — фотонов. Мы не можем нарисовать путешествие фотона или электрона таким же образом, как мы изображали движение в классической механике. Пример с двумя булавочными отверстиями показывает это очень ясно. Кажется, что электрон и фотон должны пройти через оба отверстия. Но так невозможно объяснить эффект, рисуя путь электрона или фотона в старом классическом смысле.

Мы должны, конечно, предположить существование таких элементарных действий, как прохождение электронов или фотонов через отверстия. Существование элементарных квантов вещества и энергии не может, конечно, вызывать сомнения. Но законы, управляющие ими, не могут быть сформулированы непременно путем определения координат и скоростей в любой момент по простому методу классической механики.

Поэтому попробуем нечто другое. Будем непрерывно повторять одни и те же элементарные процессы. Пусть электроны посылаются один за другим по направлению к крошечным отверстиям. Слово «электрон» употребляется здесь ради определенности; наши рассуждения справедливы также и для фотонов.

Один и тот же эксперимент повторяется много раз совершенно одинаковым образом; все электроны имеют одинаковую скорость и движутся в направлении к двум отверстиям. Едва ли нужно напоминать, что это идеализированный эксперимент, который нельзя выполнить в действительности, но который легко можно себе представить. Мы не можем выбрасывать отдельные фотоны или электроны в заданные моменты времени, подобно пулям из ружья.

Результатом серии повторенных экспериментов снова должны быть темные и светлые кольца в случае одного отверстия и темные и светлые полосы в случае двух. Но имеется одно существенное отличие. В случае одного индивидуального электрона результат эксперимента был непонятен. Его легче понять, когда эксперимент повторяется много раз. Теперь мы можем сказать, что светлые полосы появляются там, где падает много электронов. Полосы становятся темнее в тех местах, в которых падает меньше электронов. Совершенно темное пятно означает, что в это место не попал ни один из электронов. Мы, конечно, не можем считать, что все электроны проходят через одно из отверстий. Если бы это было так, то было бы безразлично, закрыто другое отверстие или нет. Но мы уже знаем, что в том случае, когда второе отверстие закрыто, мы получаем совершенно другой результат. Так как частица неделима, то мы не можем представить себе, что она проходит через оба отверстия. Тот факт, что эксперимент был повторен много раз, указывает на другой выход. Некоторые электроны могли пройти через первое отверстие, а другие через второе.

Мы не знаем, почему индивидуальные электроны выбирают то или иное отверстие, но конечный результат целой серии экспериментов должен показать, что оба отверстия участвуют в пропуске электронов от источника к экрану. Если мы устанавливаем только то, что происходит с

совокупностью электронов, когда эксперимент повторяется, не обращая внимания на поведение индивидуальных частиц, то различие между двумя картинками — дифракционные кольца и дифракционные полосы — становится понятным. Рассмотрение последовательности экспериментов породило новую идею о совокупности, состоящей из индивидуальностей, поведение которых нельзя предсказать.

Мы не можем предсказать поведение одного индивидуального электрона, но мы можем предсказать, что в конечном результате на экране будут появляться светлые и темные полосы.

Оставим на время квантовую физику.

В классической физике мы видели, что если мы знаем координаты и скорость материальной точки в известный момент времени и действующие на нее силы, мы можем предсказать ее будущую траекторию. Мы видели также, как механистическая точка зрения применялась к кинетической теории вещества. Но в этой теории из наших рассуждений возникает новая идея. Для полного понимания последующих доводов полезно эту идею освоить.

Пусть имеется сосуд, содержащий газ. При попытке проследить движение каждой частицы нужно было бы начать с нахождения начальных состояний, т. е. начальных координат и скоростей всех частиц. Даже если бы это было возможно, то человеческой жизни не хватило бы только для того, чтобы записать результат на бумаге, так как нужно было бы рассмотреть огромное количество частиц. Если бы мы затем попытались применить известные методы классической механики для подсчета конечных положений частиц, трудности были бы непреодолимы. Принципиально возможно воспользоваться методом, применяемым для рассмотрения движения планет, но практически этот метод бесполезен и должен уступить место *статистическому методу*. Этот метод не требует какого-либо точного знания начальных состояний. Мы меньше знаем о системе в любой данный момент и, следовательно, меньше имеем возможностей сказать что-либо о ее прошлом или будущем. Нам безразлична судьба индивидуальных частиц газа. Наша задача другого характера. Мы, например, не спрашиваем: «Какова скорость каждой частицы в данный момент?»

Но мы спрашиваем: «Сколько частиц имеют скорость между 1000 и 1100 метрами в секунду?» Мы не заботимся об отдельных индивидуумах. То, что мы желаем определить, суть средние значения, характеризующие всю совокупность. Ясно, что статистический метод рассуждения можно провести лишь тогда, когда система состоит из очень большого числа индивидуумов.

Применяя статистический метод, мы не можем предсказать поведение отдельного индивидуума совокупности. Мы можем только предсказать *вероятность* того, что он будет вести себя некоторым определенным образом. Если наши статистические законы говорят нам, что одна треть частиц имеет скорость между 1000 и 1100 метрами в секунду, то это означает, что, повторяя наблюдения над многими частицами, мы действительно получим в среднем этот результат, или, иными словами, это означает, что вероятность нахождения частицы со скоростью внутри этого интервала равна одной трети.

Точно так же знание числа рождений в большом обществе еще не означает знания того, что какая-то отдельная семья осчастливлена рождением ребенка. Это означает лишь знание статистических результатов, в которых вклад отдельных личностей не играет роли.

Наблюдая за номерами большого числа вагонов, мы скоро заметим, что одна треть этих номеров делится на три. Но мы не можем предсказать, будет ли номер вагона, который пройдет в следующий момент, обладать этим свойством или нет. Статистические законы можно применять только к большим совокупностям, но не к отдельным индивидуумам, образующим эти совокупности.

Теперь мы можем вернуться к нашим квантовым проблемам.

Законы квантовой физики суть законы статистического характера. Это означает, что они относятся не к одной индивидуальной системе, а к совокупности идентичных систем; они не могут быть подтверждены измерением, проделанным над отдельным индивидуумом, а подтверждаются лишь серией повторных измерений.

Радиоактивный распад является одним из многих явлений, для которых квантовая физика пытается сформулировать законы, управляющие самопроизвольным превра-

щением одного элемента в другой. Мы знаем, например, что в течение 1600 лет половина грамма радия распадается, а половина остается. Мы можем предсказать, сколько приблизительно атомов распадется в следующие полчаса, но мы не можем сказать даже в нашем теоретическом описании, почему именно эти отдельные атомы обречены на гибель. Согласно нашим современным знаниям, мы не имеем средств, чтобы указать индивидуальный атом, осужденный на распад. Судьба атома не зависит от его возраста. Нет ни малейшего следа законов, управляющих их индивидуальным поведением. Можно сформулировать только статистические законы, законы, управляющие большими совокупностями атомов.

Возьмем другой пример. Пусть спектр светящегося газа некоторого элемента, помещенного перед спектроскопом, состоит из линий определенных длин волн. Появление дискретной серии волн определенных длин является характеристикой атомных явлений, в которых обнаруживается существование элементарных квантов.

Но имеется еще и другая сторона этой проблемы. Некоторые из спектральных линий очень ярки, а другие слабы. Линия ярка, если испускается сравнительно большое число фотонов, относящихся к этой отдельной длине волны; линия слаба, если испускается сравнительно небольшое число фотонов, относящихся к этой длине волны. Утверждения теории опять имеют лишь статистический характер. Каждая линия соответствует переходу от более высокого уровня энергии к более низкому. Теория сообщает нам лишь вероятности каждого из этих возможных переходов, но ничего не говорит о действительном переходе какого-либо индивидуального атома. Теория действует великолепно, потому что во всех этих явлениях участвуют большие совокупности, а не отдельные индивидуумы.

Кажется, что новая квантовая физика имеет некоторое сходство с кинетической теорией материи: обе они — статистического характера и обе относятся к большим совокупностям. Но это не так! В этой аналогии очень важно увидеть не только сходство, но и различие. Сходство между кинетической теорией вещества и квантовой физикой лежит, главным образом, в их статистическом характере. Но каковы различия?

Если мы хотим знать, сколько мужчин и женщин в возрасте свыше двадцати лет проживает в городе, мы должны дать каждому гражданину заполнить анкету с вопросами: «мужчина», «женщина», «возраст». Предполагая, что каждый ответ правильный, мы можем, подсчитав и распределив ответы, получить результат статистического характера. При этом индивидуальные имена и адреса, указанные в ответе, не будут приняты во внимание. Наш статистический вывод получен на основе ознакомления с каждым отдельным индивидуумом. Подобно этому в кинетической теории материи мы имеем статистические законы, управляющие поведением совокупностей, полученные на основе индивидуальных законов.

Но в квантовой физике положение дел совершенно другое. Здесь статистические законы даны непосредственно. Индивидуальные законы исключены. В примере фотона или электрона, проходящих через два отверстия, мы видели, что мы не можем описать возможное движение элементарных частиц в пространстве и времени так, как мы это делали в классической физике.

Квантовая физика отказывается от индивидуальных законов элементарных частиц и устанавливает *непосредственно* статистические законы, управляющие совокупностями. На базе квантовой физики невозможно описать положения и скорости элементарной частицы или предсказать ее будущий путь, как это было в классической физике. Квантовая физика имеет дело только с совокупностями, и ее законы суть законы для толпы, а не для индивидуумов.

Жесткая необходимость, а не спекуляция или желание новизны вынуждает нас изменять старые классические взгляды. Трудности применения старых взглядов были очерчены лишь для одного примера, для дифракционных явлений. Но можно было бы указать и многие другие, одинаково убедительные примеры. Наша попытка понять реальность вынуждала нас к непрерывному изменению взглядов. Но всегда лишь будущему предстоит решить, избрали ли мы единственный возможный выход и было ли найдено наилучшее разрешение всех трудностей.

Мы должны были отказаться от описания индивидуальных случаев, как объективных явлений в пространстве и

времени; мы должны были ввести законы статистического характера. Они являются основной характеристикой со-временной квантовой физики.

Раньше, когда мы указывали на новые физические реальности, на электромагнитное поле и поле тяготения, мы стремились в общих словах описать характерные черты уравнений, посредством которых идеи формулировались математически. То же самое мы сделаем теперь с квантовой физикой, касаясь только очень кратко работ Бора, де-Бройля, Шредингера, Гейзенберга, Дирака и Борна.

Рассмотрим случай одного электрона. Электрон может находиться под влиянием произвольного внешнего электромагнитного поля или же быть свободным от всех внешних воздействий. Он может двигаться, например, в поле атомного ядра или может дифрагировать, проходя через кристалл. Квантовая физика учит нас, как формулировать математические уравнения для любой из этих проблем.

Мы уже указывали на аналогию между колеблющейся струной, мембраной барабана, духовым инструментом или любым другим музыкальным инструментом, с одной стороны, и излучающим атомом — с другой. Имеется некоторое сходство и между математическими уравнениями, управляющими акустическими проблемами, и уравнениями, управляющими проблемами квантовой физики. Но опять физическое толкование величин, используемых в этих случаях, совершенно различно. Физические величины, описывающие колеблющуюся струну и излучающий атом, имеют совершенно разный смысл, несмотря на некоторое формальное сходство в уравнениях. В случае струны мы спрашиваем об отклонении произвольной точки от ее нормального положения в произвольный момент времени. Зная форму колеблющейся струны в данный момент, мы знаем все, что нам надо. Отклонение от нормального положения для любого другого момента можно рассчитать из математических уравнений для колеблющейся струны. Тот факт, что некоторое определенное отклонение от нормального положения соответствует каждой точке струны, выражается более строго следующим образом: в любой момент времени отклонение от нормального положения



есть функция координат струны. Все точки струны образуют одномерный континуум, и отклонение есть функция, определенная в этом одномерном континууме; оно может быть подсчитано из уравнения колебаний струны.

Аналогично, в случае электрона некоторая функция определена в любой точке пространства в любой момент времени. Назовем эту функцию *волной вероятности*. В нашей аналогии волна вероятности соответствует отклонению от нормального положения в акустической задаче. Волна вероятности для данного момента есть функция трехмерного континуума, в то время как в случае струны отклонение для данного момента времени есть функция одномерного континуума. Волна вероятности образует каталог наших сведений о квантовой системе и позволяет нам ответить на все разумные вопросы, относящиеся к этой системе. Она не говорит нам о положении и скорости электрона в любой момент времени, ибо такой вопрос не имеет смысла в квантовой физике. Но она говорит нам о вероятности встретить электрон в том или ином месте или говорит нам о том, где мы имеем наибольший шанс встретить электрон. Результат относится не к одному, а ко многим повторяющимся измерениям.

Таким образом, уравнения квантовой физики определяют волну вероятности так же, как уравнения Максвелла определяют электромагнитное поле, а гравитационные уравнения определяют поле тяготения. Законы квантовой физики суть опять-таки структурные законы. Но смысл физических понятий, определяемых этими уравнениями квантовой физики, гораздо более абстрактен, чем в случае электромагнитного поля и поля тяготения; они дают только математическое средство для разрешения вопросов статистического характера.

До сих пор мы рассматривали электрон в некотором внешнем поле. Если бы это был не электрон, наименьший из возможных зарядов, а некоторый заметный заряд, содержащий биллион электронов, мы могли бы отбросить всю квантовую теорию и трактовать задачу согласно нашей старой доквантовой физике. Говоря о токах в проводниках, о заряженных проводниках, об электромагнитных волнах, мы можем применять нашу старую простую физику, содержащуюся в уравнениях Максвелла. Но мы не можем этого

Делать, когда говорим о фотоэлектрическом эффекте, об интенсивности спектральных линий, радиоактивности, дифракции электронных волн и о многих других явлениях, в которых обнаруживается квантовый характер вещества и энергии. Тогда мы должны, так сказать, идти этажом выше. В то время как в классической физике мы говорили о координатах и скоростях одной частицы, теперь мы должны рассматривать волны вероятности в трехмерном континууме, соответствующие этой задаче об одной частице.

Если мы раньше учились, как толковать задачу с точки зрения классической физики, то квантовая механика дает свой собственный рецепт толкования аналогичной задачи.

Для одной элементарной частицы, электрона или фотона, мы имеем волны вероятности в трехмерном континууме, характеризующие статистическое поведение системы, если эксперименты часто повторяются. Но как дело обстоит в случае не одной, а двух взаимодействующих частиц, например двух электронов, электрона и фотона или электрона и ядра? Мы не можем рассматривать их отдельно и описывать каждый из них с помощью волны вероятности в трех измерениях именно благодаря их взаимодействию. В самом деле, не очень трудно догадаться, как следует описывать в квантовой механике систему, состоящую из двух взаимодействующих частиц. Мы должны спуститься на один этаж, вернуться на минуту к классической физике. Положение двух материальных точек в пространстве в любой момент характеризуется шестью числами, по три для каждой точки. Все возможные положения двух материальных точек образуют шестимерный континуум, а не трехмерный, как это было в случае одной точки. Если мы теперь снова поднимаемся на один этаж, к квантовой физике, мы будем иметь волны вероятности в шестимерном, а не в трехмерном континууме, как это было в случае одной частицы. Аналогично этому для трех, четырех и более частиц волны вероятности будут функциями в континууме девяти, двенадцати и более измерений.

Это ясно показывает, что волны вероятности более абстрактны, чем электромагнитное и гравитационное поля, существующие и распространяющиеся в нашем трехмерном

пространстве. Континуум многих измерений образует основу для волн вероятности, и только для одной частицы число измерений становится равным числу измерений физического пространства. Единственное физическое значение волны вероятности состоит в том, что она позволяет нам дать ответ на разумные вопросы статистического характера как в случае многих частиц, так и в случае одной. Так, например, в случае одного электрона мы могли бы спросить о вероятности нахождения электрона в некотором определенном месте. Для двух частиц наш вопрос был бы таким: какова вероятность встречи двух частиц в двух данных местах в данный момент времени?

Наш первый отход от классической физики состоял в отказе от описания индивидуальных случаев, как объективных событий в пространстве и времени. Мы были вынуждены использовать статистический метод с его волнами вероятности. Встав однажды на этот путь, мы вынуждены и дальше идти путем абстракций. Необходимо было ввести и волны вероятности во многих измерениях, соответствующие задаче о многих частицах.

Ради краткости назовем все, кроме квантовой физики, физикой классической. Классическая и квантовая физика различаются радикально. Классическая физика видит свою цель в описании объектов, существующих в пространстве, и в формулировке законов, управляющих их изменениями во времени. Но явления, обнаруживающие дискретную и волновую природу вещества и излучения, несомненный статистический характер таких элементарных явлений, как радиоактивный распад, дифракция, испускание спектральных линий и многие другие, вынуждают нас отказаться от этого взгляда. Квантовая физика не ставит своей целью описание индивидуальных объектов в пространстве и их изменений во времени. В квантовой физике нет места таким утверждениям, как: «этот объект таков-то, он имеет такое-то свойство». Вместо этого мы имеем утверждения такого рода: «Имеется такая-то вероятность того, что индивидуальный объект таков-то и что он имеет такое-то свойство». В квантовой физике нет места для законов, управляющих изменениями индивидуального объекта во времени. Вместо этого мы имеем законы, управляющие изменениями вероятности во времени. Только это фундаментальное

изменение, внесенное в физику квантовой теорией, сделало возможным адекватное объяснение событий, несомненно дискретного и статистического характера, в той области явлений, в которой обнаруживают свое существование элементарные кванты вещества и излучения.

Однако возникают новые, еще более трудные проблемы, пока еще не сформулированные ясно. Мы напомним лишь некоторые из этих нерешенных проблем. Наука не является и никогда не будет являться законченной книгой. Каждый важный успех приносит новые вопросы. Всякое развитие обнаруживает со временем все новые и более глубокие трудности.

Мы уже знаем, что в простом случае одной или многих частиц мы можем перейти от классического к квантовому описанию, от объективного описания событий в пространстве и времени к волнам вероятности. Но мы помним весьма важное понятие поля в классической физике.

Как описать взаимодействие между элементарным квантом вещества и полем? Если для квантового описания десяти частиц необходима волна вероятности в тридцати измерениях, то для квантового описания поля была бы необходима волна вероятности с бесконечным числом измерений. Переход от классического понятия поля к соответствующей проблеме волн вероятности в квантовой физике — это очень трудный шаг. Поднятие на один этаж здесь — нелегкая задача, и все сделанные до сих пор попытки разрешить эту проблему следует считать неудовлетворительными. Имеется и еще одна фундаментальная проблема. Во всех наших рассуждениях о переходе от классической физики к квантовой мы употребляли прежде, дорелятивистское описание, в котором пространство и время трактуются раздельно.

Однако если мы пытаемся начать с классического описания, как оно предлагается теорией относительности, то переход к квантовой задаче оказывается гораздо более сложным. Это вторая проблема, над которой бьется современная физика и которая еще далека от полного и удовлетворительного разрешения. Есть еще другая трудность в создании последовательной физики тяжелых частиц, составляющих ядро. Несмотря на множество экспериментальных данных и множество попыток бросить свет на

проблему ядра, мы еще находимся в неведении относительно некоторых наиболее фундаментальных вопросов в этой области.

Нет сомнения, что квантовая физика объяснила очень богатое разнообразие фактов, достигая в большинстве случаев блестящего согласия между теорией и наблюдением. Новая квантовая физика уводит нас еще дальше от старого механистического воззрения, и отступление к прежнему положению кажется теперь, более чем когда-либо, неправдоподобным. Но нет также никакого сомнения и в том, что квантовая физика все еще должна будет базироваться на двух понятиях — на понятиях вещества и поля. В этом смысле она — дуалистическая теория, которая не приближает ни на один шаг реализацию нашей старой проблемы — свести все к понятию поля.

Пойдет ли дальнейшее развитие по линии, избранной в квантовой физике, или же более вероятно то, что в физику будут введены новые революционные идеи? Не сделает ли дорога прогресса вновь крутой поворот, как она часто делала это в прошлом?

За последние несколько лет все трудности квантовой физики сконцентрировались вокруг нескольких принципиальных пунктов. Физика нетерпеливо ожидает их разрешения. Однако невозможно предсказать, когда и где эти трудности будут преодолены.

## ФИЗИКА И РЕАЛЬНОСТЬ

Какие общие выводы можно сделать из развития физики, обрисованного здесь в общих чертах, представляющих лишь наиболее фундаментальные идеи?

Наука вовсе не является коллекцией законов, собранием несвязанных фактов. Она является созданием человеческого разума, с его свободно изобретенными идеями и понятиями. Физические теории стремятся образовать картину реальности и установить ее связь с обширным миром чувственных восприятий. Таким образом, единственное оправдание построений нашего разума состоит в том, образуют ли и каким путем образуют такое звено наши теории.

Мы видели новые реальности, созданные прогрессом физики. Но эту цепь создания можно проследить и позади, далеко за отправной точкой физики. Одним из самых первичных понятий является понятие объекта. Понятия дерева, лошади, любого материального тела — это творения, созданные на основе опыта, хотя восприятия, из которых они возникают, примитивны по сравнению с миром физических явлений. Кошка, терзающая мышь, тоже творит в мышлении свою собственную примитивную реальность. Тот факт, что кошка всегда реагирует одинаковым образом по отношению к любой встречающейся ей мышке, показывает, что она создает понятия и теории, которые руководят ею в ее собственном мире чувственных восприятий.

Понятие «три дерева» есть нечто, отличное от понятия «два дерева». А понятие «два дерева» отлично от понятия «два камня». Понятия отвлеченных чисел 2, 3, 4, ..., свободные от объектов, с которыми они связаны, суть создания мыслящего разума, описывающего реальности нашего мира.

Психологическое субъективное чувство времени позволяет нам упорядочить наши впечатления, установить, что одно событие предшествует другому. Но связать каждый момент времени с числом, рассматривать с помощью часов время как одномерный континуум, это уже изобретение. Таковы же понятия евклидовой и неевклидовой геометрии и наше пространство, понятое как трехмерный континуум.

Физика фактически начинается с введения понятий массы, силы и инерциальной системы. Все эти понятия суть свободные изобретения. Они приводят к формулировке механистической точки зрения.

Для физика начала девятнадцатого столетия реальность нашего внешнего мира состояла из частиц, между которыми действуют простые силы, зависящие только от расстояния. Он старался сохранить, насколько возможно, свою веру в то, что ему удастся объяснить все события в природе с помощью этих основных понятий реальности. Трудности, связанные с отклонением магнитной иглы, трудности, связанные со структурой эфира, внушили нам мысль создать более уточненную реальность. Появилось

важное изобретение — электромагнитное поле. Нужно было смелое научное воображение, чтобы осознать, что не поведение тел, а поведение чего-то находящегося между ними, т.е. поля, может быть существенно для упорядочения событий и для их понимания.

Позднейшее развитие науки разрушило старые понятия и создало новые. Абсолютное время и инерциальная система координат были отброшены теорией относительности. Ареной для всех событий были уже не одномерное время и трехмерный пространственный континуум, а четырехмерный пространственно-временной континуум, другое свободное изобретение, с новыми свойствами преобразования. В инерциальной системе координат больше не было нужды. Любая система координат оказалась одинаково пригодной для описания явлений природы.

Квантовая теория раскрыла новые и существенные черты нашей реальности. Прерывность встала на место непрерывности. Вместо законов, управляющих индивидуальностями, появились вероятностные законы.

Реальность, созданная современной физикой, конечно, далеко ушла от реальности прежних дней. Но цель всякой физической теории по-прежнему одна и та же.

С помощью физических теорий мы пытаемся найти себе путь сквозь лабиринт наблюдаемых фактов, упорядочить и постичь мир наших чувственных восприятий. Мы желаем, чтобы наблюдаемые факты логически следовали из нашего понятия реальности. Без веры в то, что возможно охватить реальность нашими теоретическими построениями, без веры во внутреннюю гармонию нашего мира, не могло бы быть никакой науки. Эта вера есть и всегда останется основным мотивом всякого научного творчества. Во всех наших усилиях, во всякой драматической борьбе между старым и новым мы узнаем вечное стремление к познанию, непоколебимую веру в гармонию нашего мира, постоянно усиливающуюся по мере роста препятствий к познанию.

*Подведем итоги:*

*Богатое разнообразие фактов в области атомных явлений опять вынуждает нас изобретать новые физические понятия. Вещество обладает зернистой структурой; оно состоит из элементарных частиц — элементарных квантов*

вещества. Зернистую структуру имеет электрический заряд и, — что самое важное с точки зрения квантовой теории, — зернистую структуру имеет и энергия. Фотоны — это кванты энергии, из которых состоит свет.

*Является ли свет волной или ливнем фотонов? Является ли пучок электронов ливнем элементарных частиц или волной?*

*Эти фундаментальные вопросы навязаны физике экспериментом. В поисках ответа на них мы должны отказаться от описания атомных явлений как явлений в пространстве и времени, мы должны еще дальше отступить от старого механистического воззрения. Квантовая физика формулирует законы, управляющие совокупностями, а не индивидуумами. Описываются не свойства, а вероятности, формулируются не законы, раскрывающие будущее системы, а законы, управляющие изменениями во времени вероятностей и относящиеся к большим совокупностям индивидуумов.*



## ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ЭЙНШТЕЙНА

---

*I. Эйнштейн о популяризации науки. Эволюция физики как «драма идей». — Вклад Эйнштейна в современную физику. — Отход от идей квантовой теории.*

*II. Какая же философия вела Эйнштейна? — Методологические выводы из разработки теории относительности. Отклонение позитивизма и операционализма. — Проблема реформы классической физики под углом зрения ее целостности. Теория тяготения Эйнштейна. — Оценка дифференциального закона как единственной формы причинности. — Рациональные пути построения физической теории. — Рационализм и кантианство в гносеологии Эйнштейна.*

*III. Гносеология Эйнштейна и реальный процесс познания. Опыт и теория у Эйнштейна. — Метод Эйнштейна в действии. Общая теория относительности или обобщенная теория тяготения? — Квантовая теория и гносеология Эйнштейна. — Единая теория поля как генеральная линия развития физики. — Заключение.*

### I

#### ЭЙНШТЕЙН О ПОПУЛЯРИЗАЦИИ НАУКИ. ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ КАК «ДРАМА ИДЕЙ»

Великий физик нашего времени Альберт Эйнштейн высоко ценил дело популяризации науки. В своей «Творческой автобиографии», написанной им к 70-летию (1949), Эйнштейн рассказывал, какое огромное влияние оказала на него научно-популярная литература еще в детские и юношеские годы \*).

До 12 лет он был глубоко религиозным, но в эти же годы религия разочаровала его. Что же было тому причиной? «Чтение научно-популярных книжек, — писал он, — привело меня вскоре к убеждению, что в библейских рассказах многое не может быть верным. Следствием этого было

---

\*) Перевод опубликован в журнале «Успехи физических наук», т. LIX, в. 1, 1956.

Заглавие «Творческая автобиография» дано переводчиками — В. А. Фоком и А. В. Лермантовой; сам автор озаглавил эту работу скромнее: «Autobiographisches» — «Нечто автобиографическое».

вещества. Зернистую структуру имеет электрический заряд и,—что самое важное с точки зрения квантовой теории,—зернистую структуру имеет и энергия. Фотоны — это кванты энергии, из которых состоит свет.

*Является ли свет волной или ливнем фотонов? Является ли пучок электронов ливнем элементарных частиц или волной?*

*Эти фундаментальные вопросы навязаны физике экспериментом. В поисках ответа на них мы должны отказаться от описания атомных явлений как явлений в пространстве и времени, мы должны еще дальше отступить от старого механистического воззрения. Квантовая физика формулирует законы, управляющие совокупностями, а не индивидуумами. Описываются не свойства, а вероятности, формулируются не законы, раскрывающие будущее системы, а законы, управляющие изменениями во времени вероятностей и относящиеся к большим совокупностям индивидуумов.*

## ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ЭЙНШТЕЙНА

---

*I. Эйнштейн о популяризации науки. Эволюция физики как «драма идей». — Вклад Эйнштейна в современную физику. — Отход от идей квантовой теории.*

*II. Какая же философия вела Эйнштейна? — Методологические выводы из разработки теории относительности. Отклонение позитивизма и операционализма. — Проблема реформы классической физики под углом зрения ее целостности. Теория тяготения Эйнштейна. — Оценка дифференциального закона как единственной формы причинности. — Рациональные пути построения физической теории. — Рационализм и кантианство в гносеологии Эйнштейна.*

*III. Гносеология Эйнштейна и реальный процесс познания. Опыт и теория у Эйнштейна. — Метод Эйнштейна в действии. Общая теория относительности или обобщенная теория тяготения? — Квантовая теория и гносеология Эйнштейна. — Единая теория поля как генеральная линия развития физики. — Заключение.*

### I

#### ЭЙНШТЕЙН О ПОПУЛЯРИЗАЦИИ НАУКИ. ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ КАК «ДРАМА ИДЕЙ»

Великий физик нашего времени Альберт Эйнштейн высоко ценил дело популяризации науки. В своей «Творческой автобиографии», написанной им к 70-летию (1949), Эйнштейн рассказывал, какое огромное влияние оказала на него научно-популярная литература еще в детские и юношеские годы \*).

До 12 лет он был глубоко религиозным, но в эти же годы религия разочаровала его. Что же было тому причиной? «Чтение научно-популярных книжек, — писал он, — привело меня вскоре к убеждению, что в библейских рассказах многое не может быть верным. Следствием этого было

---

\*) Перевод опубликован в журнале «Успехи физических наук», т. LIX, в. 1, 1956.

Заглавие «Творческая автобиография» дано переводчиками — В. А. Фоком и А. В. Лермантовой; сам автор озаглавил эту работу скромнее: «Autobiographisches» — «Нечто автобиографическое».

прямо-таки фантастическое свободомыслие, соединенное с выводами, что молодежь умышленно обманывается государством; это был потрясающий вывод. Такие переживания породили недоверие ко всякого рода авторитетам и скептическое отношение к верованиям и убеждениям, жившим в окружавшей меня тогда социальной среде».

В последующие годы научно-популярная литература ввела молодого Эйнштейна в круг физических и математических проблем и помогла сложиться устойчивым интересам в науке, определившим его судьбу на всю жизнь. С большой теплотой и благодарностью вспоминал он те книги, которые захватили и покорили его юношескую душу.

Поучительно отметить, какие качества он ценил в них. «На мое счастье, — писал он о книгах, познакомивших его с основами дифференциального и интегрального исчисления, — мне попались книги, в которых обращалось не слишком много внимания на логическую строгость, зато хорошо была выделена везде главная мысль. Все это занятие было поистине увлекательно... Мне повезло также получить понятие о главнейших результатах и методах естественных наук по очень хорошему популярному изданию, в котором изложение почти везде ограничивалось качественной стороной вопроса (Бернштейновские естественно-научные книги для народа — труд в 5—6 томов); книги эти я читал, не переводя дыхания».

Замечательны взгляды Эйнштейна на методы популяризации науки. Инфельд рассказывает в статье «Мои воспоминания об Эйнштейне»: «Мы ненавидели популяризацию, спекулирующую на чувствах читателя. Чтобы держать в напряжении внимание несчастного читателя, некоторые писатели жонглируют остроумием, не имеющим ничего общего с предметом; в результате в памяти читателя остаются остроты, но он забывает о цели, ради которой преподнес их автор... В таких книгах подчеркиваются те результаты, которые противоречат здравому рассудку простого человека, для того, чтобы показать, как мудры и просвещенны ученые... Хорошая популяризация может и должна возбуждать чувства не экскурсами в область метафизики, а вызываемым ею усилием постижения, мучительным и в то же время радостным усилием все более полного и глубокого постижения.

Однако, чтобы решиться на такого рода популяризацию, следует отказаться от внешних эффектов. Это значит, надо писать ясно и просто, убеждая читателя, что наука опирается на зрелый и развитый здравый рассудок, что ее целью является воссоздание картины окружающей нас действительности».

Существенно также отметить, что Эйнштейн связывал дело популяризации науки не с удовлетворением праздного любопытства, а видел в нем средство обогащения духовной жизни народа. В предисловии к книге Линкольна Барнетта «Эйнштейн и Вселенная» (1950) он писал: «Недостаточно того, что отдельные результаты признаются, разрабатываются и применяются немногими специалистами. То обстоятельство, что научные знания являются достоянием лишь маленькой группы людей, снижает философский уровень народа, приводит к его духовному оскудению».

Эта мысль Эйнштейна становится особенно весомой на нынешнем этапе развития физических наук, когда их содержание стало крайне абстрактным и не наглядным, когда они находят свое выражение только в форме, доступной лишь узкому кругу лиц, работающих по данной проблеме, и когда их философское значение сильно возросло.

Таковы глубокие мысли о значении и методах популяризации естественных наук, высказанные величайшим корифеем науки. Многим нашим ученым и популяризаторам полезно было бы их учитывать.

И тем не менее сам Эйнштейн самостоятельно не написал ни одной общедоступной книги, хотя всегда сожалел о том, что разработанная им теория относительности непонятна для неспециалистов. Свою попытку в 1916 году написать такую книгу он не считал удачной: книга получилась трудной, и он сам острил, что вопреки подзаголовку она скорее «общенедоступна». Других попыток не было, если не считать небольших газетных статей о теории относительности для широкой публики. Это, видимо, следует объяснить огромной целеустремленностью ученого и тем, что при любых результатах он всегда ощущал незавершенность своих больших идей и потребность отдать им все силы.

Тут, однако, помог Леопольд Инфельд, польский физик, состоявший в 1936—1938 годах ассистентом Эйнштейна в Институте высших исследований в Принстоне, в США. В своих воспоминаниях об Эйнштейне Инфельд рассказывает, по какому поводу появилась книга двух авторов «Эволюция физики». Институт предоставил Инфельду стипендию только на один год. Надо было обеспечить ему материальную возможность продолжать научную работу. Прямую денежную помощь от Эйнштейна он отказался бы принять. Возникла идея написать совместно книгу о физике для широкой публики и тем заодно решить и финансовую проблему Инфельда. «Мысль о том, чему посвятить книгу, родилась в голове Эйнштейна, — вспоминает Инфельд. — Он намеревался написать популярную книгу, содержащую основные идеи физики в ее логическом развитии. По Эйнштейну, в физике имеется лишь несколько принципиальных идей, и они могут быть выражены словами. — Ни один ученый не мыслит формулами, — говорил он часто».

Но первоначальный план — написать «просто популярную книгу» — в ходе работы над ней изменился. Авторы решили: «она должна представлять нечто большее! Это должна быть книга, из которой я (Инфельд. — С. С.) и другие физики смогут что-то извлечь — не конкретные факты, а новую точку зрения, идеи, расположенные в правильной перспективе; это должна быть научная книга, но в то же время написанная как можно проще».

Эйнштейн был захвачен идеей изложить развитие физики как «драму идей», в которой новое вечно приходит в столкновение со старым. «Наша книга, — говорил он, — должна быть интересной, захватывающей для каждого, кто любит науку».

Так в 1938 году появилась эта книга, из которой, по замыслу ее авторов, не только широкие круги интеллигенции, но и специалисты-физики могут извлечь «новую точку зрения, идеи, расположенные в правильной перспективе».

Естественно, что «Эволюция физики» не представляет собой истории физики в обычном смысле, она не описывает все ее теоретические и технические достижения, не показывает связи физики с развитием производительных сил. В ней широкими штрихами нарисованы картина общего

развития физических идей, логическая линия развития физики, смена физических воззрений от механической картины мира до «полевой», сделана попытка нарисовать перспективы дальнейшего развития физики. В рамках поставленной задачи книга описывает только принципиальные научные открытия, которые явились поворотными пунктами в развитии физических теорий. Она показывает те активные силы, которые вынуждают науку создавать идеи, отражающие реальность нашего мира, дают «некоторые представления о вечной борьбе изобретательного человеческого разума за более полное понимание законов, управляющих физическими явлениями» (стр. 6).

Книга оказалась действительно общедоступной, а для тех, кто будет внимательно следить за логикой развития идей, прямо-таки захватывающей. Но главное достоинство ее состоит в том, что она является отражением физического мышления одного из крупнейших ученых современности, мышления глубокого и поразительно целеустремленного. Вот почему этой книге был обеспечен огромный интерес со стороны не только представителей смежных специальностей, но и физиков. Она многократно переиздавалась на языке оригинала (английском) и переводилась на многие языки мира. После двух изданий на русском языке можно сказать, что большой интерес к ней проявил и советский читатель.

Развитие физики действительно показано в книге как «драма идей». Эта драма достигла наивысшего напряжения в годы жизни Эйнштейна и при его непосредственном участии. Более того, он сам до конца вскрывал все возможные коллизии в столкновении физических идей. На всех этапах исследований он стремился создать единую логическую систему, отображающую закономерности мира; вместе с тем он способствовал развитию идей, которые если не преграждали, как полагал позднее сам Эйнштейн, то, несомненно, усложняли путь к этой единой картине мира. При этом он сам пережил драму ученого, оставшись в своих взглядах почти в одиночестве, и это после того, как он уже был признанным знаменосцем и вождем современной физики.

Об этой персонифицированной драме в книге ничего не сказано, а между тем знакомство с ней очень поучительно.

## ВКЛАД ЭЙНШТЕЙНА В СОВРЕМЕННУЮ ФИЗИКУ

Эйнштейн вступил на арену научной деятельности в самом начале XX века, в знаменательный и переломный для физики период. В истории физики этот период характеризуется не только известными открытиями электрона, радиоактивности, развитием кинетической теории газов, спектральных методов и т. п., но и мощным подъемом теоретической мысли. Среди физических теорий наряду с термодинамикой получила огромное значение теория электромагнитного поля Максвелла.

Еще незадолго до того, далекую от наглядных представлений теорию Максвелла многие физики встречали с явным скепсисом. Однако к началу XX века эта теория, казавшаяся крайне абстрактной и непонятной, уже показала глубокую связь с реальным миром, с техникой. Ее реальная познавательная ценность выразилась в подтверждении существования предсказанных ею электромагнитных волн (Г. Герц, 1887), в быстром развитии на этой основе радиотехники (А. Попов, 1895), в объединении всех электромагнитных излучений в единую по своей природе шкалу, включая в нее и свет, в раскрытии связи электромагнитных и оптических свойств вещества. В студенческие годы Эйнштейна теория Максвелла уже стала проникать в учебные планы европейских университетов.

Но в этот же период были обнаружены и существенные затруднения теории. Они были связаны с необходимостью применить электродинамику к движущимся заряженным телам. Этой проблемой занимались выдающиеся физики того времени: Лоренц, Пуанкаре, Абрагам, Ланжевен и другие. Занимала эта проблема и молодого Эйнштейна.

Трудности возникали в связи с тем, что теория Максвелла описывала взаимодействие проводника и магнита так, что различались два случая взаимодействия: первый — когда проводник покоится, а магнит движется, а второй — при обратной ситуации. В случае, когда движется магнит, картина представлялась такой: силовые линии возникающего при движении магнита электрического поля пересекают проводник и возбуждают в нем ток. Когда же магнит покоится, а движется проводник, то, с точки зре-



ния теории Максвелла, электрическое поле не возникает, но в проводнике появляется электродвижущая сила, вызывающая точно такой же эффект. Таким образом, теория Максвелла рассматривала эти два случая как разные, хотя и не отличающиеся по их проявлениям.

Это обстоятельство, подмеченное Эйнштейном, было характеризовано им как несимметричность формы теории в отношении обоих случаев. Тем самым теория неявным образом допускала наличие в природе одной-единственной системы отсчета, по отношению к которой можно установить, что покоится, а что движется. Несимметричность формы теории была неадекватна самому явлению. В самом деле, известно, что для возбуждения тока в проводнике существенно перемещение магнита и проводника лишь *относительно друг друга*. Эта равноправность систем отсчета подтверждалась и тем фактом, — уже в то время широко использованным в технике, — что процессы в динамо, вырабатывающем ток, и в моторе, в котором ток преобразуется в энергию вращения ротора, обратимы.

Выявление существенной роли именно относительного движения означало, что и электродинамическую теорию следует формулировать так, чтобы ее уравнения были справедливыми для любых систем отсчета, для которых справедливы также и уравнения механики.

Наряду с этим надо было учесть и установленный экспериментально факт независимости скорости передачи электромагнитного сигнала (скорости света) от движения его источника.

Именно эти теоретические проблемы и рассматривает Эйнштейн в своей знаменитой работе «К электродинамике движущихся тел» (1905), в которой развиты основы теории относительности. Теория привела к формулировке условий инвариантности электродинамических законов в инерциальных системах. Эти условия состоят в том, что физические величины, которые ранее считались инвариантными (расстояния, время, масса, магнитная и электрическая напряженности и проч.), в действительности оказываются относительными: при переходе к новой инерциальной системе они преобразуются по определенному закону, зависящему от относительной скорости движения системы.

Физическое и принципиальное значение теории относительности огромно. Пожалуй, до того ни одна теория еще не приносила столько новых обобщающих идей. Здесь мы только напомним о важнейших из них.

Оказалось несостоятельным метафизическое представление о наличии абсолютной системы отсчета, абсолютном пространстве и времени. Потерпела крах идея о мировой среде — эфире — специфическом носителе электромагнитных процессов, физические свойства которого физики тщетно пытались определить в XIX веке. Выявилась необоснованность трактовки ряда свойств тел как абсолютных, не зависящих от состояния движения их. Установлена связь массы и энергии.

Теория относительности положила начало представлению о пространственно-временном континууме, физические свойства (метрика) которого определяются находящимися в нем массами. Развивая эти идеи, Эйнштейн создал обобщенную теорию тяготения, показав, что поля тяготения естественно включаются в континуум через изменение его метрики. Теория тяготения Эйнштейна привела к предсказанию новых физических явлений, о чем будет подробнее сказано ниже.

Зародившись как абстрактная теория, которая должна была разрешить теоретические трудности, возникшие в электродинамике движущихся тел, теория относительности в наше время вошла в практику атомных исследований. Без учета ее выводов нельзя конструировать современные ускорители элементарных частиц, невозможно производить расчеты ядерных реакций. Даже человеку, далекому от современной ядерной техники, ясно, как велико должно быть практическое значение такой теории. Однако это еще не все.

Теория относительности наложила глубокий отпечаток на все другие, настоящие и будущие, физические теории: в предельной области высоких скоростей они должны отвечать ее формальным требованиям. Поэтому наряду с обычной квантовой механикой возникает *релятивистская* квантовая механика, наряду с классической космологией — *релятивистская* космология и т. д.

Теория относительности оказала огромное влияние на самое мышление физиков. Она показала важную роль

обобщения и обобщающих наук. Вместе с ней в физике появился дух новаторства, смело ломающий застывшие взгляды на физические понятия, всегда требующий обобщенного подхода к физическим явлениям.

Но вклад Эйнштейна в физику не ограничивается созданием теории относительности и обобщенной теории тяготения, вместе со всеми обновляющими идеями, которые они несли. Его заслуги огромны и в других областях физики, в которых надо было прокладывать первые тропы. О важнейших из них необходимо здесь рассказать и не только потому, что они меньше известны широким кругам, но и ввиду особой отрицательной позиции, какая выявилась у Эйнштейна позднее по отношению к тем направлениям в физике, мощный импульс к развитию которых он сам же дал.

Здесь надо прежде всего указать на преобразование, которое Эйнштейн произвел во взглядах на природу света.

Известно, что Планк, проанализировав условия, при которых так называемое излучение абсолютно черного тела должно находиться в равновесном состоянии, установил (1900) связь энергии ( $\varepsilon$ ) и частоты ( $\nu$ ) света:  $\varepsilon = h\nu$ , где  $h = 2\pi\hbar$  — планковская постоянная, которая равна  $6,63 \cdot 10^{-27}$  эрг·сек. Наличие такой связи удивляло физиков, поскольку она была необычной в аспекте классической физики, согласно которой энергия волны связана с ее амплитудой, а не частотой.

Но в первые годы эту связь еще не трактовали глубоко. По свидетельству Макса Борна, ее считали своеобразной гипотезой, пригодной лишь для данного случая. Экспериментаторы не проявляли к ней интереса, считая ее «инструментом теоретиков», полезным лишь для того, чтобы свести концы с концами в каком-то сугубо теоретическом вопросе о распределении энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Теоретиков эта странная связь энергии и частоты беспокоила: вместе с ней появилась идея о квантованности энергии, но никто не знал, как это понимать. Теоретики не шли далее того, чтобы представить себе механизм, посредством которого осциллятор может испускать и поглощать только определенные порции энергии. Особенности затруднения испытывались при отыскании механизма поглощения, поскольку

Все еще исходили из представления, что энергия на осциллятор падает непрерывно: по-видимому, каким-то образом она должна накапливаться, прежде чем быть поглощенной. Никто из физиков, в том числе и сам Планк, не подозревал, что из открытия обобщенной формулы излучения абсолютно черного тела могут последовать революционные идеи, которые раскроют перед физикой совершенно новые горизонты.

Решающий шаг сделал Эйнштейн. Он первый осознал основополагающее значение квантовых идей \*) и стал рассматривать ряд известных к тому времени затруднений классической физики в свете квантовых представлений.

Одно из таких затруднений представляло явление фотоэлектрического тока (фотоэффект). Фотоэффект был открыт еще Генрихом Герцем, Гальваксом и другими физиками в восьмидесятых годах прошлого века и тогда же был обстоятельно исследован А. Г. Столетовым. Как известно, этот эффект состоит в том, что лучи света, падая на металлическую пластинку, вырывают из нее поток электронов, создающий ток в замкнутом контуре. Столетов нашел закономерную связь фототока со светом, его вызывающим. Оказалось, что сила фототока зависит не от яркости возбуждающего света, как ожидалось в соответствии с законами классической физики, а от цветности падающих лучей, иначе говоря, от частоты падающего на пластинку излучения. Эту закономерность невозможно было объяснить по законам классической физики. Фотоэффект противоречил этим законам. В течение почти двух десятилетий он оставался загадочным явлением.

Эйнштейн рассмотрел теперь это явление в свете квантовых представлений и нашел, что оно получает простое и непротиворечивое объяснение, если предположить, что сам световой поток представляет собой поток квантов (фотонов), несущих энергию, пропорциональную частоте:  $\epsilon = h\nu$ , как это и соответствует планковскому кванту энергии. Тогда ясно, что энергия, переданная квантом света свободному электрону пластинки, будет зависеть не от яркости света, а именно от его частоты. Найденное

---

\*) У Эйнштейна были к этому свои основания, о которых будет сказано ниже.

ранее Планком соотношение получило в работах Эйнштейна ясный смысл: взаимодействие света с веществом, в процессе которого вещество поглощает или испускает квант энергии, определяется *квантовой структурой самого света*, тем, что сам световой поток состоит из потока световых квантов. При этом объяснении отпадает необходимость придумывать для атома специальный механизм, регулирующий испускание и поглощение световой энергии квантами: сама световая энергия прерывна.

В той же работе — «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» (1905) — Эйнштейн применил квантовые идеи для объяснения правила смещения Стокса в люминесценции, а также к фотоионизации газа; он показал, что во всех подобных явлениях происходит превращение кинетической энергии электрона в световой квант или наоборот. Во всех процессах взаимосвязи электронов и света передаваемая энергия излучения пропорциональна частоте и постоянной  $h$ . Это уже легко проверить экспериментально.

Насколько взгляды Эйнштейна были новы и революционны для того времени, свидетельствует факт, описываемый А. Ф. Иоффе в статье «Памяти Альберта Эйнштейна» (1956). В 1907 году Иоффе стал экспериментально проверять фотонную теорию света на натрии и калии, а в 1909 году попытался вывести из теории фотонов законы равновесной лучистой энергии. О своих результатах он послал статью в журнал «Анналы физики», редактором которого был Планк. Иоффе пишет: «Последний [Планк], познакомившись с моей статьей, которую он затем все же опубликовал в своем журнале..., убеждал меня в необходимости оставаться на почве классических представлений Максвелла и не идти дальше, чем это крайне необходимо, ограничиться своеобразием механизма излучения, допускать, если это окажется неизбежным, своеобразие в поглощении света электроном и ряд других частных гипотез, но не порывать с теорией электромагнитного поля и не посягать на самый свет. «Классическая теория дала нам столько полезного, что к ней надо относиться с величайшей осторожностью и охранять ее», — говорил Планк».

Вслед за квантовым объяснением фотоэффекта, явлений люминесценции, ионизации газа Эйнштейн рассмотрел

и еще одну загадку, которая не находила решения в аспекте классической физики. Речь идет о теплоемкости твердых тел при низких температурах. Согласно классической физике, на каждую степень свободы сложной физической системы приходится одинаковая доля энергии из находящейся в системе. Зная число степеней свободы физической системы, можно было рассчитать удельную теплоемкость любого вещества; она не должна была зависеть от температуры вещества (закон Дюлонга и Пти). Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы подтверждался экспериментами для доступных в то время не слишком низких температур; это доказывало, что расчеты классической физики имели определенное обоснование. Казалось, что этот закон раскрывает простой и наглядный механизм распределения энергии внутри физической системы и потому является незыблемым. Однако к этому времени уже выяснилось, что при температурах, приближающихся к абсолютному нулю, теплоемкость становится меньше теоретически вычисленной; это отступление становится резким для кристаллических тел, особенно таких как алмаз. Классическая физика не могла дать объяснения этому факту. И опять для объяснения этой закономерности Эйнштейн применил к внутриатомным и молекулярным связям идею об их квантовой природе. Работы эти были вслед за тем успешно продолжены и углублены Дебаем, Борном, Карманом и другими.

Мы видим, что Эйнштейн чрезвычайно расширил применение квантовых идей, показав их определяющую роль в атомной физике. Тем самым он дал мощный побуждающий толчок бесчисленным исследованиям физиков в этом направлении. Становилось ясным, что в свете новых идей должны быть проанализированы и все уже известные физике трудности, и все вновь открываемые явления. Новые идеи становились генеральной линией развития физики.

Необходимо подчеркнуть, что для исследований Эйнштейна этих лет характерна одна черта: глубокая связь новых теоретических идей с экспериментом. Сугубо абстрактные методы и гипотезы он применял к практическим проблемам, которые волновали физиков, и сразу вносил в них ясность; при этом он доводил свои теоретические

рассуждения до формы, в которой их легко можно было проверить экспериментально. Поэтому вслед за исследованиями Эйнштейна стали появляться в большом числе экспериментальные работы по самым различным проблемам атомной физики. Эти работы неизменно подтверждали его выводы. Они показали, что гипотеза квантов, которая до Эйнштейна рассматривалась только как удобный прием для расчетов в теории излучения абсолютно черного тела, на самом деле есть открытие новой стороны физических процессов и что на всю атомную физику надо смотреть теперь только с позиций квантовой гипотезы.

До применения квантовых идей непосредственно к атомной структуре физика дошла позднее, в начале второго десятилетия, после знаменитых экспериментальных исследований Резерфорда, вскрывших ядерную структуру атома, и на их основе. В этих исследованиях принимал близкое участие и Нильс Бор, работавший в то время (1912) в группе Резерфорда в Манчестере. Ему принадлежит честь создания первой модели квантованного атома.

Эйнштейн в этот период был полностью поглощен разработкой теории тяготения и участия в исследованиях структуры атома не принимал. Но кто может отрицать, что мощным импульсом, побуждавшим Нильса Бора, было также влияние идей Эйнштейна, убедительно показавшего решающую роль квантовых связей во всей атомной физике? Сам Бор в «Воспоминаниях о Резерфорде...» (1961) писал об истории своих работ: «Это открытие (кванта действия.— С. С.), в особенности в работах Эйнштейна, нашло весьма перспективные приложения в теории тепломкостей и фотохимических реакций. Поэтому совершенно независимо от новых экспериментальных данных, касающихся строения атома, существовало широко распространенное убеждение в том, что квантовые представления могут иметь решающее значение для всей проблемы атомного строения вещества». Это убеждение как раз и возникло под влиянием работ Эйнштейна. О широкой распространенности такого убеждения говорит и тот упоминаемый Бором факт, что попытки применить квантовые идеи к структуре атома предпринимались в то время многими физиками (А. Гааз, Дж. Никольсон, Н. Бьеррум и другие).

Конечно, нельзя сказать, что среди физиков было сразу достигнуто полное единодушие. Были и скептики. Известен, например, такой факт, относящийся к 1913 году. Ряд крупных немецких физиков — Нернст, Рубенс, Варбург, во главе с Планком — обратились к прусскому министерству просвещения с ходатайством о приглашении в Берлинскую академию наук Эйнштейна для работы на особо льготных условиях. Мотивируя это ходатайство, его авторы указывали, что Эйнштейн — крупный ученый-новатор, который по всем большим проблемам современной физики занимает примечательную позицию. И далее в ходатайстве было сказано: «То, что он в своих рассуждениях иногда выходит за пределы цели, как, например, в своей гипотезе световых квантов, не следует слишком сильно ставить ему в упрек. Ибо не решившись пойти на риск, нельзя осуществить действительно нового даже в самом точном естествознании». Смысл этих фраз: виновен, но заслуживает снисхождения.

Но физика неумолимо развивалась, и шестивие квантовых идей уже нельзя было остановить, особенно после успешного их применения к объяснению структуры атомов. А после открытия эффекта Комптона (1923), доказавшего наличие у фотонов импульса, окончательно утвердилось и фотонная гипотеза света.

Но Эйнштейн положил начало не только широкому «квантовому мышлению», он показал также огромные возможности статистических методов физики.

Несколько позднее Гиббса, но, по-видимому, незадолго от него, Эйнштейн разработал общие методы статистической механики и, что особенно существенно, в форме, которая позволила сразу же приложить их к анализу броуновского движения — хаотического движения мельчайших, видимых в микроскоп частиц, взвешенных в жидкости. На рубеже XX века было высказано немало различных гипотез о причинах движения броуновских частиц. Одна из гипотез состояла в утверждении, что такой причиной является тепловое движение ненаблюдаемых молекул жидкости, которые со всех сторон толкают взвешенную частицу; равнодействующая всех получаемых частицей импульсов не равна нулю, а постоянно и хаотически изменяется вследствие непрерывного хаотического



изменения отдельных импульсов. Задача состояла в том, чтобы отыскать связи *наблюдаемых* величин с *ненаблюдаемыми* и тем самым обосновать причину процесса. Эйнштейн показал статистический характер этой связи; таким путем он рассчитал размер молекул жидкости, число их в грамм-молекуле и другие параметры. Расчеты Эйнштейна нашли свое подтверждение. Тем самым он поднял кинетическую теорию вещества с уровня возможной гипотезы до уровня физической, доступной проверке, теории.

Выводы из этих статистических работ Эйнштейна имели также существенное методологическое значение. «Я думаю, — справедливо пишет Макс Борн в статье «Статистические теории Эйнштейна» (1949), — что эти исследования Эйнштейна больше, чем все другие работы, убеждают физиков в реальности атомов и молекул, в справедливости теории теплоты и фундаментальной роли вероятности в законах природы». Нелишне напомнить, что это было время (1902—1906), когда некоторые физики отрицали реальность атомов просто потому, что они непосредственно не наблюдаемы, не даны в ощущениях. Вспоминая об этих своих работах в автобиографии (1949), Эйнштейн сам утверждает: «При этом главной моей целью было найти такие факты, которые возможно надежнее устанавливали бы существование атомов определенной конечной величины». И действительно, он вправе был заключить: «Согласие этих выводов (касающихся определения параметров атомов.—С. С.) с опытом, а также сделанное Планком определение истинной величины молекул из закона излучения (для высоких температур) убедили многочисленных тогда скептиков (Оствальд, Мах) в реальности атомов».

Нужно подчеркнуть и другую сторону проблемы: этими исследованиями Эйнштейна была показана эвристическая роль статистических закономерностей в физике. Впервые обнаружилось, что *статистические закономерности отражают новый тип реальных связей в природе*.

Было естественно, по мере развития квантовых идей в атомной физике, учесть в статистических связях также и квантовые. Путь к этому подходу открывало фундаментальное соотношение Больцмана, связывающее термодинамическую величину — энтропию  $S$  замкнутой системы —

с вероятностью  $W$  ее состояния:  $S = k \ln W$ , откуда  $W = e^{S/k}$ . Больцман вывел это соотношение для систем, подчиняющихся законам классической механики. Но статистические закономерности имеют то преимущество, что они обладают огромной общностью, не зависят от природы исследуемых объектов. Эйнштейн применил их к анализу структуры излучения абсолютно черного тела. Соотношение Больцмана он использовал для определения вероятности случайной концентрации полной энергии  $E$  в определенной части объема  $\alpha V$ , вычислив энтропию  $S$  из найденного Вином закона излучения. Эта вероятность равна:  $W = \alpha^{E/h\nu}$ .

Именно этот результат чисто статистических методов привел Эйнштейна к идее, что излучение ведет себя так, как будто оно состоит из совокупности  $N = \frac{E}{h\nu}$  независимых квантов энергии величины  $h\nu$ . Этот вывод был для Эйнштейна настолько убедителен, что он немедленно стал искать прямое его подтверждение в известных физических процессах. Так он пришел к рассмотрению с новой точки зрения уже описанного выше фотоэффекта, загадка которого была, наконец, разгадана.

Эйнштейн расширял применение статистических методов и в дальнейшем. В статье «К квантовой теории излучения» (1917) он дал вывод закономерности излучения черного тела (формулы Планка), опираясь на картину излучения как чисто статистического процесса. Оказалось, что формула Планка может быть получена этим методом при условии допущения нового вида излучения, происходящего под воздействием окружающего излучателя электромагнитного поля («индуцированное излучение»). В течение ряда десятилетий индуцированное излучение существовало только как «теоретический факт». Лишь в начале пятидесятых годов был предложен способ усиления света и радиоволн, основанный на использовании индуцированного излучения, а в наши дни оно легло в основу конструирования квантовых генераторов и квантовых усилителей.

Статистический вывод Эйнштейном формулы Планка и теоретическое открытие им индуцированного излучения не только соответствовали духу квантовой физики, но и

еще более подтвердили эвристическую ценность статистических методов, их объективный смысл.

Наконец, в начале двадцатых годов Эйнштейн развил и обобщил идеи индийского физика Бозе, который применил статистические методы к фотонам как частицам, рассматривая распределение состояний в совокупности тождественных частиц. Этим методом планковский закон излучения получается непосредственно. Таким образом, квантовая статистика вела к углубленному пониманию объекта этой статистики: физический смысл имеет не счет индивидуальных предметов, а статистика их состояний. Эта специфическая квантовая статистика, названная статистикой Бозе—Эйнштейна (в отличие от квантовой статистики другого типа — Ферми — Дирака), оказалась применимой к особому классу квантовых частиц (фотоны, альфа-частицы, атомные ядра с четным числом нуклонов).

Таким образом, Эйнштейн способствовал обоснованию и широкому внедрению в физику статистических методов.

Естественно, что в это время Эйнштейна занимала проблема сближения двух образовавшихся после открытия фотонов вполне устойчивых картин: одна из них выражалась через непрерывное электромагнитное поле с его динамической закономерностью, другая — через поток фотонов с их статистическими закономерностями. В этом плане он высказал весьма важное соображение о том, что плотность фотонов в световом пучке должна совпадать с плотностью энергии электромагнитных волн в нем. Отмечая этот факт в своей нобелевской речи, Макс Борн, который обосновал статистическую трактовку волновой функции, говорил, что он, Борн, в 1927 году лишь разработал эту идею Эйнштейна в применении к волновой функции Шредингера.

Итак, на крутом повороте развития физики, когда она перешла к более глубокому обобщению электромагнитного и гравитационного полей, а также к изучению атомных процессов, Эйнштейн проявил большую проницательность исследователя, беспримерную смелость мышления, умение преодолевать устоявшиеся догмы. Эти свойства рисуют его как подлинно передового ученого. Недаром ведущие физики признали в Эйнштейне своего «знаменосца и вождя» (Борн).

## ОТХОД ОТ ИДЕЙ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

С появлением работ Резерфорда и Бора центр тяжести научных интересов в физике переместился в область исследований квантовых свойств атомных систем. Эйнштейн же, дав мощный импульс основополагающим идеям атомной физики (квантовая структура света, квантование атомных процессов, статистические методы в атомной физике), вновь сосредоточил свою творческую энергию на проблемах, связанных с дальнейшим обобщением идей относительности и теории тяготения.

Между тем уже в конце первой четверти XX века в атомной физике встали свои задачи обобщения. Раскрытые в этот период закономерности атомных явлений и излучения обнаружили квантовые свойства света и энергетических состояний атома. Однако многочисленный экспериментальный материал не был обобщен в единой теории. В свете классических представлений он казался крайне противоречивым. Квантовые свойства полей и микрообъектов выступали лишь как одна из сторон реальности. Эксперимент показывал, что другой стороной ее являлись волновые свойства. Работы де Бройля, подтвердившиеся позднее опытами Дэвисона и Джермера, а также Томсона, показали, что волновые свойства характерны не только для электромагнитного поля, но также и для вещества (для потока вещественных частиц). Хотя оба типа свойств (корпускулярные и волновые) в классическом смысле взаимно противоречат и исключают друг друга, ни одним из них нельзя было пренебрегать при характеристике квантовых явлений. Эта необычная ситуация крайне осложняла их понимание и трактовку. Далее, физики много занимались разработкой методов квантования атомных орбит (Бор, Зоммерфельд и другие); но эти методы покоились на некоторых классических соображениях и имели характер поисков решений применительно к случаю, что было явно неудовлетворительным.

Надо было создать теорию, которая органически включала бы в себя характеристику возможных квантовых переходов систем из одного состояния в другое, объединить в одной обобщенной теории волновые и корпуску-

лярные представления. Таких сложных задач перед физикой никогда еще не возникало.

Эйнштейн в этой работе участия уже не принимал. Он целиком посвятил себя задаче построения единой теории поля, в которой мысли объединить электромагнитные и гравитационные поля. Этот отход Эйнштейна от актуальных проблем атомной физики вызвал огромное огорчение и сожаление физиков.

Квантовая теория была создана в середине двадцатых годов трудами Бора, Гейзенберга, Борна, Иордана, Дирака, Шредингера, Ферми, Паули и других физиков. Как в свое время теория относительности, обобщая экспериментальные факты в области электродинамики, привела к новой широкой картине мира, раскрыв до того неизвестные свойства пространственно-временного континуума, так это сделала и квантовая механика, развившая ряд новых идей.

Квантовая механика раскрыла специфические свойства квантового объекта, существенно отличающие его от классического. Оказалось, что в нем неразрывно связаны волновые и корпускулярные свойства; он не есть нечто неизменное: в зависимости от физических условий он преобразуется, приближаясь то больше к образу волны, то к образу частицы; его особенности находят свое выражение в «соотношении неопределенностей» некоторых попарно сопряженных характеризующих квантовый объект величин (например, импульса и координат). Квантовая механика выдвинула статистическое понимание «состояния микрочастицы»; она показала, что статистические закономерности в микромире уже не могут рассматриваться как прием расчета, как мера незнания динамического хода индивидуальных процессов; они представляют собой новую форму взаимосвязей в объекте; классический детерминизм, согласно которому события развиваются однозначно и который исключает случайность, представляет собой лишь предельный и абстрактный случай \*).

Как же отнестся к этим новым идеям Эйнштейн, ученый, необычайно чуткий к логической цельности и логическому совершенству физической теории?

\*) В этой статье нет возможности и необходимости обсуждать трактовку этих проблем отдельными физиками и школами.

Эйнштейн *отказался* от пути, по которому пошло большинство физиков, разработавших квантовую теорию.

Он отказался от того пути, развитию которого, как мы видели выше, он сам в значительной мере способствовал, обосновывая квантовые воззрения во всех областях атомной физики, показывая, что квантовые задачи следует решать статистическими методами.

В книге «Эволюция физики» эти взгляды нашли лишь косвенное отражение. Отмечается, что если в классической физике мы встречаем статистические законы, «полученные на основе индивидуальных законов», то «в квантовой физике положение дел совершенно другое. Здесь статистические законы даны непосредственно. Индивидуальные законы исключены» (стр. 233). Ввиду этого оказывается невозможным ответить на ряд вопросов, например на рассматриваемый в книге вопрос о том, сквозь какую из щелей дифракционной решетки проходит «данный индивидуальный электрон».

В книге в тактичной форме читателю дается понять, что квантовая механика многие существенные и притом *закономерные* вопросы оставляет без ответа. «Мы должны были *отказаться от описания индивидуальных случаев, как объективных явлений в пространстве и времени*; мы должны были ввести законы статистического характера. Они являются основной характеристикой современной квантовой физики» (стр. 233) \*).

Авторы не говорят о том, что квантовая теория с ее статистической закономерностью — это неизбежный этап развития физики, необходимая форма разрешения проблем, стоящих перед ней. Напротив, они подчеркивают стоящие перед ней трудности (необходимость прибегать к «волнам вероятностей с бесконечным числом измерений», трудности создания релятивистской квантовой механики), указывают на задачи, которые она еще не решила. Они пишут: «В квантовой физике нет места таким утверждениям, как: «этот объект таков-то, он имеет такое-то свойство». Вместо этого мы имеем утверждения такого рода: «Имеется такая-то вероятность того, что индивидуальный

---

\* ) Здесь и повсюду в последующем, если нет оговорок, курсив принадлежит мне.

объект таков-то и что он имеет такое-то свойство». В квантовой физике нет места для законов, управляющих изменениями индивидуального объекта во времени. Вместо этого мы имеем законы, управляющие изменениями вероятности во времени» (стр. 237).

Так пишут авторы, и в общем контексте это звучит как упрек в адрес квантовой физики.

Наконец, они усиливают это впечатление, высказывая сожаление, что «квантовая физика все еще должна будет базироваться на двух понятиях — на понятиях вещества и поля. В этом смысле она — дуалистическая теория, которая не приближает ни на один шаг реализацию нашей старой проблемы — свести все к понятию поля» (стр. 238).

В книге «Эволюция физики» все страсти приглушены, только возбуждаются некоторые сомнения, обосновывается мысль, что квантовая физика лишь переходящая ступень развития (как будто это не справедливо в отношении любой теории!), что она неполноценна.

Но физики хорошо знают, как бушевали эти страсти в публичных дискуссиях, в личных беседах, в переписке с друзьями, продолжавшими разрабатывать методы квантовой физики, наконец, в упорном многолетнем стремлении Эйнштейна построить физику на других основах. Из всех этих материалов известно, что Эйнштейн рассматривал статистическое толкование квантовой механики как временную замену знания индивидуальных, однозначно определенных процессов, которое он считал единственно подлинным знанием. Он считал чуждым духу физики также и двойственный, корпускулярно-волновой характер свойств полей и объектов атомной физики; соединение таких свойств в одном объекте он считал, по-видимому, невозможным. Но суть квантовой механики как раз и состоит в том, что она отражает двойственный характер микрообъектов и полей и их статистические закономерности. Отклонить их значило отклонить всю квантовую механику.

В чем же была причина того, что Эйнштейн, этот бесстрашный новатор в науке, резко критиковал тот путь, на который вступила квантовая физика?

Конечно, наш ответ на этот вопрос может быть более или менее обоснованным только на основе анализа его

творческих устремлений. В связи с выяснением этих причин поучительно рассмотреть упрек, брошенный самим Эйнштейном Маху по поводу отказа последнего признать существование атомов и молекул.

Известно, что Мах рассматривал науку как систему упорядочения наших чувственных восприятий, как экономную мнемоническую запись «фактов ощущений», а не как отражение внешнего мира. Именно такая трактовка предмета познания привела его к отрицанию существования атомов и молекул, которые ведь непосредственно в ощущениях не встречаются. Между тем все развитие науки приводило к выводу о повышении роли познания через абстракцию, которая образуется человеком на основе переработки ощущений. Вспомним, что к установлению ряда характеристик непосредственно ненаблюдаемых атомов и молекул самого Эйнштейна привели именно абстрактные статистические методы. Естественно, что он отлично понял причины отрицательной позиции Маха и не мог их принять. В своей «Творческой автобиографии» он писал: «Предубеждение этих ученых (Оствальда и Маха.— С. С.) против атомной теории можно несомненно отнести за счет их позитивистской философской установки. Это — интересный пример того, как философские предубеждения мешают правильной интерпретации фактов даже ученым со смелым мышлением и с тонкой интуицией».

Объяснение Эйнштейна справедливо. Но, увы, оно применимо и к негативной позиции самого Эйнштейна по отношению к квантовой механике. Это подметил уже Макс Борн, один из основателей квантовой теории, близкий друг Эйнштейна. В статье «Воспоминания об Эйнштейне», приведя процитированное выше объяснение Эйнштейна, Борн заметил: «Мне кажется, что в квантовой механике это оправдывается в отношении его самого».

И действительно, позицию Эйнштейна в физике можно понять только в свете его общефилософской концепции, в свете того, как этот великий ученый понимал единство законов природы и пути его познания, как он понимал связи, существующие в природе, а также предмет исследования физики.

Однако вопрос о философских взглядах Эйнштейна не так прост.



## II

## КАКАЯ ЖЕ ФИЛОСОФИЯ ВЕЛА ЭЙНШТЕЙНА?

Как ответить на вопрос о том, какая же философия вела Эйнштейна, кто он по своим философским взглядам — материалист, идеалист или позитивист? Если подойти к решению этого вопроса методом цитат, то в его трудах можно найти достаточно высказываний в пользу любого направления.

Известно, например, что Эйнштейн высоко оценивал критическую работу Маха в отношении априорных идей Канта или введения Ньютоном в обиход классической физики понятий абсолютного пространства, времени, движения, вообще «метафизических» понятий, которым в опыте, как его понимает Мах, ничего не сопоставляется. Эйнштейн неоднократно заявлял, что концепция Маха помогла ему критически осмыслить исходные положения классической физики.

Неоднократно также Эйнштейн определял теорию как *систему упорядочения наших чувственных восприятий, а не как отражение объективных закономерностей внешнего мира*. Эти формулировки не случайны для Эйнштейна, они встречаются в его работах на протяжении всей его жизни. Так, в лекциях об основах теории относительности, читанных в Принстонском университете в 1921 году, он утверждал, что «понятие и системы понятий ценны для нас лишь постольку, поскольку они облегчают нам обозрение комплексов наших переживаний». В 1936 году в статье «Физика и реальность» Эйнштейн писал: «В противоположность психологии, физика истолковывает непосредственно только чувственные восприятия и «постижение» их связи». И далее: «Я считаю, что первый шаг в установлении «реального внешнего мира» состоит в образовании понятия телесных объектов различных видов. Из всего многообразия чувственных восприятий мы мысленно и произвольным образом выделяем постоянно повторяющиеся комплексы чувственных восприятий (частично в совпадении с чувственными восприятиями, которые могут истолковываться как знаки чувственного опыта других людей) и мы сопоставляем им понятие телесного

творческих устремлений. В связи с выяснением этих причин поучительно рассмотреть упрек, брошенный самим Эйнштейном Маху по поводу отказа последнего признать существование атомов и молекул.

Известно, что Мах рассматривал науку как систему упорядочения наших чувственных восприятий, как экономную мнемоническую запись «фактов ощущений», а не как отражение внешнего мира. Именно такая трактовка предмета познания привела его к отрицанию существования атомов и молекул, которые ведь непосредственно в ощущениях не встречаются. Между тем все развитие науки приводило к выводу о повышении роли познания через абстракцию, которая образуется человеком на основе переработки ощущений. Вспомним, что к установлению ряда характеристик непосредственно ненаблюдаемых атомов и молекул самого Эйнштейна привели именно абстрактные статистические методы. Естественно, что он отлично понял причины отрицательной позиции Маха и не мог их принять. В своей «Творческой автобиографии» он писал: «Предубеждение этих ученых (Оствальда и Маха.— С. С.) против атомной теории можно несомненно отнести за счет их позитивистской философской установки. Это — интересный пример того, как философские предубеждения мешают правильной интерпретации фактов даже ученым со смелым мышлением и с тонкой интуицией».

Объяснение Эйнштейна справедливо. Но, увы, оно применимо и к негативной позиции самого Эйнштейна по отношению к квантовой механике. Это подметил уже Макс Борн, один из основателей квантовой теории, близкий друг Эйнштейна. В статье «Воспоминания об Эйнштейне», приведя процитированное выше объяснение Эйнштейна, Борн заметил: «Мне кажется, что в квантовой механике это оправдывается в отношении его самого».

И действительно, позицию Эйнштейна в физике можно понять только в свете его общеполитической концепции, в свете того, как этот великий ученый понимал единство законов природы и пути его познания, как он понимал связи, существующие в природе, а также предмет исследования физики.

Однако вопрос о философских взглядах Эйнштейна не так прост.

## II

## КАКАЯ ЖЕ ФИЛОСОФИЯ ВЕЛА ЭЙНШТЕЙНА?

Как ответить на вопрос о том, какая же философия вела Эйнштейна, кто он по своим философским взглядам — материалист, идеалист или позитивист? Если подойти к решению этого вопроса методом цитат, то в его трудах можно найти достаточно высказываний в пользу любого направления.

Известно, например, что Эйнштейн высоко оценивал критическую работу Маха в отношении априорных идей Канта или введения Ньютоном в обиход классической физики понятий абсолютного пространства, времени, движения, вообще «метафизических» понятий, которым в опыте, как его понимает Мах, ничего не сопоставляется. Эйнштейн неоднократно заявлял, что концепция Маха помогла ему критически осмыслить исходные положения классической физики.

Неоднократно также Эйнштейн определял теорию как *систему упорядочения наших чувственных восприятий, а не как отражение объективных закономерностей внешнего мира*. Эти формулировки не случайны для Эйнштейна, они встречаются в его работах на протяжении всей его жизни. Так, в лекциях об основах теории относительности, читанных в Принстонском университете в 1921 году, он утверждал, что «понятие и системы понятий ценны для нас лишь постольку, поскольку они облегчают нам обозрение комплексов наших переживаний». В 1936 году в статье «Физика и реальность» Эйнштейн писал: «В противоположность психологии, физика истолковывает непосредственно только чувственные восприятия и «постижение» их связи». И далее: «Я считаю, что первый шаг в установлении «реального внешнего мира» состоит в образовании понятия телесных объектов различных видов. Из всего многообразия чувственных восприятий мы мысленно и произвольным образом выделяем постоянно повторяющиеся комплексы чувственных восприятий (частично в совпадении с чувственными восприятиями, которые могут истолковываться как знаки чувственного опыта других людей) и мы сопоставляем им понятие телесного

объекта». В книге «Эволюция физики» сказано: «С помощью физических теорий мы пытаемся найти себе путь сквозь лабиринт наблюдаемых фактов, упорядочить и постичь мир наших чувственных восприятий» (стр. 241).

Наконец, в его автобиографии мы встречаем: «...всякое наше мышление того же рода: оно представляет свободную игру с понятиями. Обоснование этой игры заключается в достижимой при помощи нее возможности обозреть чувственные восприятия. Понятие «истины» к такому образованию еще совсем неприменимо; это понятие может, по моему мнению, быть введено только тогда, когда имеется налицо условное соглашение относительно элементов и правил игры». И далее: «Система понятий есть творение человека, как и правила синтаксиса, определяющие ее структуру... Все понятия, даже и ближайшие к ощущениям и переживаниям, являются с логической точки зрения произвольными положениями, точно так же как и понятие причинности, о котором в первую очередь и шла речь».

Таковы суждения Эйнштейна, в которых, несомненно, обнаруживается влияние позитивистской философии.

Однако известно и другое. Мы помним, что позитивистские взгляды Оствальда и Маха Эйнштейн назвал философскими предубеждениями, помешавшими им найти правильное истолкование фактам, приводящим к признанию атомов и молекул. Далее, свое несогласие с идеями квантовой механики, в частности с введением ею статистической закономерности наряду с динамической, Эйнштейн мотивировал тем, что переход от описания самих вещей к описанию вероятностей появления вещей есть переход к позитивизму. Критикуя аргументацию в пользу квантовой механики, он в «Ответе на критику» (1949) писал: «*Что мне не нравится* в подобного рода аргументации, — это, по моему мнению, *общая позитивистская позиция*, которая, с моей точки зрения, *является несостоятельной* и которая, по моему мнению, ведет к тому же самому, что и принцип Беркли — *esse est percipi* (существовать — значит быть воспринимаемым)». Эйнштейн считал, что защита статистической трактовки квантовой механики есть защита позитивистских взглядов. Даже в дружеской переписке Эйнштейн выступает против позитивизма. В

конце сороковых годов, говоря о желательной встрече с Борном, он писал ему: «Хотя ты никогда не согласишься с моей точкой зрения, она тебя могла бы позабавить. Я бы тоже получил удовольствие, разбив твои позитивистские философские взгляды».

Впрочем, Макс Борн не был согласен с таким обвинением. Комментируя это письмо, Макс Борн говорил Зелигу, издателю и биографу Эйнштейна: «Эти строки касаются моих взглядов на основные вопросы физики. Я, как и Нильс Бор и Вернер Гейзенберг, защищаю статистическую квантовую механику, в то время как Эйнштейн стоит на позициях классического детерминизма. Вообще же я *вовсе не последователь позитивизма*». Как видим, к позитивистам не хочет быть причисленным и выдающийся физик нашего времени Макс Борн, и он действительно много сделал для того, чтобы развенчать позитивизм в глазах зарубежных ученых \*).

Но вернемся к Эйнштейну. Это, конечно, серьезный довод, чтобы не признавать Эйнштейна позитивистом, если он отклонял целое направление в физике, огромное *практическое* значение которого он всегда и безоговорочно признавал, отклонял из-за того, что считал его основу позитивистской. Другое дело, прав ли Эйнштейн, толкуя квантовую физику как по существу своему позитивистскую; в данном случае существенно подчеркнуть, что, отклоняя ее, он руководствовался антипозитивистскими мотивами.

Крайне интересное понимание процесса познания высказано Эйнштейном в статье «Влияние Максвелла на эволюцию идей о физической реальности», написанной к столетию со дня рождения Максвелла в 1931 году. Эту статью он начинает со следующего утверждения: «*Вера в существование внешнего мира, независимого от воспринимающего субъекта, есть основа всего естествознания*. Но так как чувственное восприятие дает информацию об этом внешнем мире, или о «физической реальности», только

\*) См. С. Суворов, Макс Борн и его философские взгляды, в книге: Макс Борн, Физика в жизни моего поколения, ИЛ, 1963, а также: С. Суворов, Проблема «физической реальности» в копенгагенской школе, Успехи физических наук, т. LXII, в. 2, июнь 1957.

опосредованно, мы можем охватить последнюю только умозрительными средствами. Из этого следует, что *наши представления о физической реальности никогда не могут быть окончательными*. Мы всегда должны быть готовы изменить эти представления, то есть изменить аксиоматическую базу физики, — чтобы оправдать факты восприятия логически наиболее совершенным образом. И действительно, беглый взгляд на развитие физики показывает, что она испытывает глубокие изменения с течением времени».

Это высказывание вполне в духе материализма, и трудно понять, как Эйнштейн совмещает столь противоположные точки зрения.

Однако он не только их совмещает, но и отлично при этом сознает, какое недоумение может вызвать это совмещение. Но он относит это недоумение за счет философов, которые-де слишком жестки в своих концепциях, представляющих собой, правда, цельную, но все же абстрактную схему. Естествоиспытателя же невозможно уложить в какую-либо схему. Его положение, по Эйнштейну, сложнее потому, что он должен считаться с результатами своих исследований и принимать точки зрения, несовместимые в одной системе. В своем «*Ответе на критику*» он пишет, что философ, однажды додумавшийся до какой-то системы, «...будет склонен интерпретировать богатство идей точных наук в смысле своей системы и не признавать того, что под его систему не подходит. Ученый же *не может себе позволить*, чтобы устремления к теоретико-познавательной систематике заходили так далеко. Он с благодарностью принимает теоретико-познавательный анализ понятий, но внешние условия, которые поставлены ему фактами переживаний, *не позволяют ему при построении своего мира понятий слишком сильно ограничивать себя установками одной теоретико-познавательной системы*. В таком случае он должен систематизирующему философу-гносеологу показаться своего рода беспринципным оппортунистом. *Он кажется р е а л и с т о м* (т. е. материалистом.—С. С.), *поскольку старается представить не зависящий от актов ощущений мир; и д е а л и с т о м* — *поскольку смотрит на понятия и на теории как на свободные изобретения человеческого духа* (не выводимые логи-

чески из эмпирически данного); *п о з и т и в и с т о м* — поскольку рассматривает свои понятия и теории лишь настолько обоснованными, насколько они доставляют логическое представление связей между чувственными переживаниями. Он может показаться даже *п л а т о н и к о м* или *п и ф а г о р е й ц е м*, поскольку рассматривает точку зрения логической простоты необходимым и действенным инструментом своего исследования» \*).

Эйнштейн по разным поводам подчеркивает невозможность для естествоиспытателя придерживаться какой-либо одной философской системы. Отвечая Маргенау по поводу его утверждения о том, что «позиция Эйнштейна... содержит черты рационализма, а также крайнего эмпиризма», Эйнштейн в «Ответе на критику» пишет: «Это замечание совершенно правильно. Откуда происходит эта флуктуация? Логическая система понятий является физикой постольку, поскольку ее понятия и утверждения необходимо приведены в связь с миром переживаний (experiences). Тот, кто желает установить такую систему, встретится с опасным препятствием в виде произвола выбора. Вот почему стараются по возможности прямо и необходимым образом связать свои понятия с миром переживаний. В этом случае взгляды исследователя эмпиричны. Этот путь часто плодотворен, но он всегда открыт для сомнений в силу того, что отдельное понятие и единичное утверждение может выражать нечто сопоставляемое с эмпирически данным в конечном счете *только в связи с целостной системой*. Тогда признают, что *никакого пути от данного в опыте к миру понятий нет*. Тогда взгляды исследователя становятся скорее рационалистическими, потому что он признает логическую независимость системы. В такой позиции возникает опасность того, что при поисках этой системы можно потерять всякий контакт с миром переживаний. *Колебания между этими крайностями кажутся мне неустраняемыми*».

Конечно, нельзя согласиться с неизбежностью для естествоиспытателя выглядеть в глазах философа «беспринципным оппортунистом» и находиться в вечном, неустраняемом колебании между философскими «крайностями».

---

\* ) Курсивная разрядка — выделение Эйнштейна.

Если философия существует как наука, а не как предвзятая схема, то в ней непротиворечивым образом должны быть обобщены такие категории, как объективный внешний мир, ощущения как информации о внешнем мире, понятия и теории как обобщение этих информационных, представляющие собой образ объективной реальности. Мы твердо убеждены, что такая философия существует.

Но философия Эйнштейна, действительно, не такова, и тот факт, что она не такова, он сам оценивал не как ее недостаток, а *как ее достоинство*. Эйнштейн прав, утверждая, что философию такого естествоиспытателя, то есть собственно его, Эйнштейна, философию, одни философы (философы-схоласты) будут причислять к позитивистской, другие — к реалистической (материалистической), и одни будут порицать за то, за что другие будут восхвалять. В частности, это можно видеть и по нескольким статьям сборника, посвященного 70-летию Эйнштейна, в котором различные авторы делают попытку анализа философских взглядов Эйнштейна. Например, Филипп Франк, физик и философ, профессор кафедры теоретической физики в Пражском немецком университете, глава «венского кружка» неопозитивистов, прямо зачисляет Эйнштейна в ряды активных проводников «логического позитивизма». А Бриджмен — физик и философ, главный идеолог операционализма — считает, что при обосновании специальной теории относительности Эйнштейн выступал как операционалист. Среди советских ученых также высказывались самые крайние оценки философских взглядов Эйнштейна. Мы видели, что повод для этих крайних оценок дал сам Эйнштейн, впрочем, мало беспокоившийся о них.

Однако правильнее будет рассматривать взгляды Эйнштейна во всей их сложности и постараться понять, откуда она появилась. И тут он сам дал хороший совет, как относиться к самооценкам ученого. В интересной спенсеровской лекции «О методе теоретической физики» (1933) он говорил: «Если вы хотите кое-что выяснить у физиков-теоретиков о методах, которые они применяют, я советую вам твердо придерживаться одного принципа: *не слушайте, что они говорят, а лучше изучайте их действия*. Тому, кто в этой



области что-то открывает, продукты его творческого воображения кажутся ему столь необходимыми и естественными, что он рассматривает их не как создания мышления, а как данные реальности. И ему хотелось бы, чтобы так их рассматривали и другие».

Это справедливый совет. Профессиональная деятельность накладывает глубокий отпечаток на весь образ мышления ученого, да и вообще любого деятеля. Через это окно профессиональной деятельности он видит мир, его внешний облик, его закономерности, способ его постижения. *Чего достиг ученый в науке, как ему представляется путь к этому достижению — в этом лежит разгадка его, подчас сложного противоречивого мировоззрения.* Здесь по нашему мнению, лежит ключ к пониманию взглядов и самого Эйнштейна, противоречивость которых с точки зрения целостной философии он понимал и сам.

Но в таком случае мы должны будем ответить на вопрос о том, что же было главным в профессиональной деятельности Эйнштейна?

Вряд ли можно сомневаться в том, что при всех замечательных идеях Эйнштейна в области квантовой и статистической физики основной стороной его деятельности всегда были (и оставались главными для него самого) развитие теории относительности и его, эйнштейновская, система обобщения и расширения сферы применения этой теории. Электромагнитные и гравитационные поля, еще только становившиеся в годы его юности реальностями для физиков, пространственно-временной континуум как единая теоретическая основа для всей физики, — вот круг тесно связанных друг с другом проблем, которые с ранних пор и до конца жизни владели Эйнштейном, в развитие которых гениальный ученый вложил свою душу и разум.

Работа над этими проблемами и метод их решения как раз и оказали решающее влияние на взгляды Эйнштейна. Мы должны, следовательно, попытаться рассмотреть вопрос о том, к каким философским идеям могли привести и, по-видимому, привели Эйнштейна его разработка теории относительности и раздумье над ее результатами.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ  
ИЗ РАЗРАБОТКИ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.  
ОТКЛОНЕНИЕ ПОЗИТИВИЗМА И ОПЕРАЦИОНАЛИЗМА

В начале века физики встретились с необходимостью дать более совершенную, «симметричную» формулировку электромагнитной теории Максвелла. Этого требовали физические факты.

Но построение симметричной электродинамики привело к большим следствиям, выходящим за пределы решения частной задачи, которая ставилась непосредственно. Изменилась не только форма электродинамической теории, изменились и представления о пространстве, времени, длине, длительности и т. д., вообще изменились представления о связи физических категорий. Хотели только приспособить теорию поля к фактам, несколько подправить ее, а пришли к опровержению понятий ньютоновской физики, введенных как априорные, внеопытные, к выводу о том, что физические величины зависят от состояния движения тела по отношению к системе отсчета, в которой это движение выражается.

В наше время эта зависимость принимается как факт, но в то время остро встал вопрос: как ее объяснить?

Известно, что тогда появились попытки объяснить эту зависимость как результат непосредственного физического взаимодействия движущегося тела с полем; начались поиски механизма, приводящего к изменению параметров движущегося тела (так называемые гипотезы сокращения Лоренца — Фитцджеральда).

Эйнштейн отверг эти объяснения. В своих первых работах по теории относительности он пытался с помощью «мысленного опыта» показать, что, поскольку длина линейки, к примеру, есть результат измерения, она зависит от *процедуры измерения*, которая различна для тела движущегося и покоящегося относительно наблюдателя.

Бриджмен был прав, утверждая, что подход Эйнштейна к определению физических понятий в это время был операционалистским, точнее, именно такое обоснование изменения физических величин через процедуру измерения положило начало целому направлению в философии — операционализму, которое в дальнейшем развивал

Бриджмен. Согласно операционализму, любое физическое понятие можно вводить в науку только в том случае, если ему можно сопоставить определенную операцию измерения, которой и определяется смысл понятия. Казалось, что история физики вполне укладывалась в эту операционалистскую методологию: Ньютон погрешил перед физикой тем, что ввел в нее абсолютные понятия, которым нельзя сопоставить никакой операции измерения (что, впрочем, Ньютон сознавал и сам); Эйнштейн отбросил внеопытные понятия ньютоновской физики и показал, что в соответствии с процедурой измерения изменяются и сопоставленные ей понятия. Теорию можно строить только на основе таких операционально определенных понятий путем связывания их в законы.

Этот операционалистский подход к обоснованию изменения физических величин, к определению понятий вообще, довольно широко распространен в физике до сих пор; многие книги, посвященные, в частности, теории относительности, не исключая и эйнштейновских, начинают ее изложение с рассмотрения процедуры измерения, якобы определяющей смысл понятий \*).

Но хотя Эйнштейн и дал повод к развитию операционализма, сам он вовсе не последовал ему в своих дальнейших исследованиях, чем и заслужил упрек Бриджмена. Свою статью «Теории Эйнштейна и операционалистская точка зрения» в упомянутом выше сборнике Бриджмен прямо начинает с этого упрека: «В этой статье делается попытка показать, что Эйнштейн в свою общую теорию относительности *не перенес те уроки и то понимание, которым он сам учил нас в своей специальной теории относительности*». И это, действительно, так.

Почему же Эйнштейн отошел от операционалистской методологии?

Потому, что теория относительности не давала оснований для операционалистской методологии, как не давала она их и для позитивизма, и для принципа наблюдаемости, который позднее хотели оправдать ссылками на эйнштейновский метод построения этой теории. Напротив

---

\*) Критика операционализма дана в статье автора «Операционализм», Большая Советская Энциклопедия, 2-е изд.

того, в теории относительности отражался совсем иной подход к определению содержания понятий и к структуре теорий. Размышляя над итогами теории относительности, Эйнштейн в какой-то мере, по-видимому, это осознал, что видно и из методов его защиты положений теории относительности, и из его последующих приемов исследования, и из его, правда более поздних, высказываний.

Известно, что многие выводы теории относительности подверглись резкой критике вследствие их необычности. Они действительно были необычны. Таков, например, вывод о том, что длина *одной и той же* линейки различна в различных инерциально движущихся системах; вызывало недоумение то, что это изменение оказывается *взаимным*, так что длина линейки, покоящейся в системе  $S$  и равная в ней единице, будет в инерциально движущейся системе  $S'$  укорачиваться, точно так же как длина линейки, покоящейся в системе  $S'$  и равная в ней единице, будет укорачиваться в системе  $S$  и притом в том же отношении. Достаточно эти эффекты в целях наглядности и конкретности сформулировать при помощи термина «наблюдатели, сидящие в системах  $S$  и  $S'$ », как описание того, что они «наблюдают», получает крайне субъективистскую форму.

Так оно и было, и это в то время вызывало огромное сопротивление физиков и философов.

Вызывали критику необычные выводы о том, что в системе, совершающей путешествие, процессы должны протекать замедленнее, чем в системе, остающейся в это время неподвижной, ввиду чего, скажем, космонавт, летавший к далекой звезде и вернувшийся обратно на Землю, оказывается «моложе» своих сверстников на Земле.

Противоречили повседневному опыту и наглядному представлению новый закон сложения скоростей, изменение массы «благодаря только движению» и т. п.

Все аналогичные выводы теории относительности казались парадоксальными с точки зрения непосредственных восприятий или привычного опыта. Многочисленные попытки связать указанные в теории закономерности поведения каждой физической категории непосредственно

с изменением структуры движущегося тела не приводили к положительным результатам. В те времена сравнительно большие относительные скорости, могущие оказать экспериментально уловимый эффект, достигались только у электронов в катодных лучах ( $\approx 0,1 c$ ). Исследуя отклонение катодных лучей в магнитном поле, Кауфман установил (1902—1906) факт изменения массы быстро движущихся электронов, но сам закон изменения не был определен из этих экспериментов. Последовал ряд работ (М. Абрагам, Дж. Герглоц, П. Герц, А. Зоммерфельд и другие), в которых авторы пытались представить механизм этого изменения (главным образом через приписывание массе электромагнитного происхождения и определение связи ее с полем). Позднее эти попытки были оставлены.

Все это свидетельствует о трудностях, с которыми было связано развитие новых представлений. Неслучайно у теории относительности на протяжении долгих десятилетий оказывалось немало противников.

Однако выводы теории оправдывались. Физики, и в первую очередь Эйнштейн, все более приходили к мысли, что справедливость новых представлений о природе и изменениях физических категорий может быть подтверждена лишь ссылкой на то, что она является *логическим результатом релятивистской теории* (как «релятивистский эффект»), которую физики вынуждены были создать, преследуя непосредственно другую цель — обобщить принцип относительности и факт независимости скорости света от движения его источника.

Таким образом, создание теории относительности подводило Эйнштейна к раскрытию *единства* физических понятий, их *связи с теорией в целом*. Эта связь понятий была адекватным отображением связи физических категорий в самом объекте. Например, изменение длин и длительности в инерциально движущихся системах находит свое объяснение в том, что они существуют не сами по себе, а связаны в некую целостность через *инвариантный интервал*.

Со временем Эйнштейн все более укреплялся в этой позиции. Есть основания полагать, что огромное влияние в этом отношении оказали на физиков и на Эйнштейна,

в частности, труды выдающегося математика Германа Минковского. В 1908 году он опубликовал работу «Основания теории электромагнитных процессов в движущихся телах», в которой пространство и время были обобщены в единый четырехмерный «мир» с псевдоевклидовой геометрией.

Идея единства пространства и времени была изложена Минковским в известном популярном докладе «Пространство и время» (1908) обществу немецких естествоиспытателей и врачей, который он начал знаменитым афоризмом: «Отныне пространство само по себе и время само по себе должны быть низведены до роли теней, и только *некоторый вид соединения обоих должен по-прежнему сохранять самостоятельность*».

В физике проблема связи понятий и теории в такой резкой форме встала впервые. Ньютон вводил некоторые понятия — абсолютные пространство, время, движение, массу и проч. — еще до теории, как внешние определения, как условие формулировки законов. У Маха (позитивизм) все понятия выступали как символическое обозначение отличительных признаков некоторого комплекса восприятий, имели мнемоническо-служебную цель и вводились до теории. У Бриджмена (операционализм) понятия должны были прежде всего получить определение через непосредственную операцию измерения, и лишь после того как это оказывалось возможным, они могли быть использованы в теории.

Однако реальное развитие физической теории показало, что содержание физических понятий не может быть определено вне теории, *до теории*. В этом отношении оказались неправы и Ньютон, и Мах, и Бриджмен. Понятия должны выступать как органическая часть теории, которая *в целом* отвечает реальным фактам восприятий, и только через эту целостность отвечают фактам и те категории, которые она использует, — таков вывод, к которому все более склонялся Эйнштейн.

Несомненно, эта идея уже владела Эйнштейном, когда он приступал к разработке теории тяготения, которую он рассматривал как дальнейшее обобщение принципа относительности, как второй этап развития теории относительности.

ПРОБЛЕМА РЕФОРМЫ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
ПОД УГЛОМ ЗРЕНИЯ ЕЕ ЦЕЛОСТНОСТИ.  
ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА

Нельзя не видеть различия в задачах, которые ставил Эйнштейн на первом и втором этапах развития физической теории. На первом этапе была конкретная физическая задача — привести уравнения Максвелла в соответствие с требованием симметрии электромагнитных процессов и с фактом независимости скорости света от движения его источника. В результате Эйнштейн обнаружил, что *разумно построенная теория вскрывает взаимосвязи понятий, о которых вне обобщающей теории и не подозревали*, не подозревали именно потому, что подход к развитию науки был слишком эмпиричен.

Теперь, после получения плодотворных результатов, Эйнштейн уже на всю классическую физику стал смотреть иными глазами, глазами критика. Он увидел, что дело не только в том, что Ньютон включил в физику внеопытные понятия абсолютного пространства, времени, дальнедействующих сил и проч.; о происхождении их и сам Ньютон проявлял беспокойство. Дело в том, что и все другие понятия классической физики были слишком слабо «упакованы» в единой теории, так как возникали они независимо друг от друга из разрозненного опыта. В уже упомянутой лекции «О методе теоретической физики» Эйнштейн говорил: «Ньютон, первый основатель обширной работоспособной системы теоретической физики, был еще убежден в том, что основные понятия и законы его системы происходят из опыта. Его слова *hypotheses non fingo* (гипотез я не строю) можно понять в этом смысле. Действительно, появившиеся в это время понятия пространства и времени не создавали никаких проблем. Понятия массы, инерции и силы и связанные с ними законы казались взятыми непосредственно из опыта. Раз эта база была принята, то и выражение для силы тяготения казалось выведенным из опыта и было основание ожидать то же самое в отношении других сил».

Для Эйнштейна было ясно, что при таком понимании метода образования понятий и законов — из разрозненного опыта — в классической физике неизбежно должны

были возникать понятия, хотя и различные по происхождению, по их связи с экспериментами, но эквивалентные по природе. Так, «специальная теория относительности» вскрыла эквивалентность массы и энергии. Очевидно, накопление таких понятий, которые позднее оказываются эквивалентными, не есть достоинство метода, в результате которого они возникали; теория построенная на основе таких понятий, *не может быть совершенной*.

Свою важнейшую задачу Эйнштейн видел теперь в том, чтобы *реформировать классическую физику, навести в ней порядок, удалить из нее все понятия, сформулированные вне связи с теорией, а также излишние, эквивалентные понятия*, которые так же не нужны теории, как автомобилю пятое опорное колесо.

Результатом таких методологических установок Эйнштейна явилась разработанная им обобщенная теория тяготения, истолкованная им как «общая теория относительности».

Таким образом, появление этой теории не было вынуждено противоречием существующей теории с каким-либо новым экспериментом. Эйнштейн сам понимал свой путь как *результат требования «внутреннего совершенства» теории, логической стройности общей картины мироздания*. Именно это различие причин возникновения «специальной» и «общей» теории относительности привело к такой ситуации, которую Макс Борн в своей лекции «Физика и относительность» (1955) отмечает в следующих словах: «Специальная теория относительности была открытием в конечном счете не одного человека. Работа Эйнштейна была тем последним и решающим элементом в фундаменте, заложенном Лоренцем, Пуанкаре и другими, на котором могло держаться здание, воздвигнутое затем Минковским». Над проблемами, возникшими в связи с электродинамикой движущихся систем, работали многие физики, в том числе и Эйнштейн, вложивший «решающий элемент» в теорию. А вот «внутренним совершенством» классической теории практически занимался только Эйнштейн. Поэтому Борн и отмечает, что «в противоположность специальной теории относительности, это была работа одного человека».

Главная идея новой теории Эйнштейна состояла в том, чтобы пространственно-временной континуум, к идее



которого привела теория относительности, представить как единую сущность внешнего физического мира.

Что выигрывает от этого физика?

В классической физике все ее законы разрознены, они связывают физические категории, представления о смысле которых возникали в различных экспериментах. В новой физике континуума все физические законы должны быть представлены как свойства этого континуума, как его *метрика*. Это и позволяет улучшить «концептуальный фундамент» физики, удалить из нее излишние понятия, представить ее как единую систему.

С этой новой позиции Эйнштейн рассмотрел закон тяготения Ньютона. Вместо сил тяготения он стал оперировать с полями тяготения; это уже делала и классическая физика, но там это было скорее только «формальным приемом». Поля тяготения Эйнштейн включил в пространственно-временной континуум как его «искривление». Метрика континуума перестала быть евклидовой (точнее псевдоевклидовой), она стала «римановой метрикой». Тем самым из физики были удалены дальнедействующие силы Ньютона, которые всегда считались слабым пунктом ньютоновой физики. «Кривизна» континуума рассматривается как следствие соответствующего «распределения движущихся масс» в нем. Опираясь на идеи римановой геометрии, Эйнштейн ввел меру кривизны пространства-времени (в ковариантной форме) в виде некоторого «тензора кривизны». Для «распределения движущихся масс» в этом континууме он также нашел некоторую специфическую меру — «тензор энергии-импульса». Важнейшим результатом всех этих исследований Эйнштейна является установление взаимосвязи между тензором энергии-импульса (распределением движущихся масс) и тензором кривизны пространства-времени (метрикой континуума). Найденное уравнение играет здесь роль, аналогичную роли ньютонова уравнения движения масс в обычном евклидовом пространстве.

Понятия, которыми оперирует в этой теории Эйнштейн, имеют весьма абстрактный характер. Но схема взаимосвязей здесь довольно проста. «Распределение движущихся масс» в континууме определяет его «кривизну». Кривизна континуума определяет «геодезические линии» в нем — «линии кратчайших расстояний». Кривизна, гео-

дезические линии континуума, — это его существенные свойства, они определяют происходящие в нем процессы. Так, массы, не создающие большого поля, перемещаются в континууме только вдоль геодезических линий.

В евклидовом пространстве геодезическими линиями являются прямые. Согласно ньютоновой механике вдоль этих прямых происходит *инерционное* движение. Но рассмотрение всех других движений требует в ньютоновой механике введения новых физических категорий — сил, определения закона их действия, возникает проблема передачи действия сил на расстояние и т. д. и т. п. К тому же теория тяготения Ньютона не объясняет полностью все процессы, связанные со взаимодействием масс. Так, например, констатируя наличие вращения перигелия планет, близких к Солнцу (Меркурий), она не приводит к точной величине этого вращения. Теория Ньютона отражает действительность лишь для слабых полей и небольших скоростей масс.

Тот факт, что теория Эйнштейна не требует введения сил тяготения, а взаимодействие масс учитывается в ней через характер искривления пространственно-временного континуума, т. е. через его общее свойство, раскрывает новые возможности теории. В самом деле, общие свойства континуума, раз они найдены, определяют характер любых физических процессов, в нем происходящих. Например, из этого следует, что вдоль геодезических линий континуума должны перемещаться не только массы, но и лучи света; если геодезические линии континуума искривлены, то и распространение света не будет прямолинейным. Это должно обнаружиться в областях континуума, в которых искривление линий достаточно велико, например при прохождении луча вблизи Солнца, где поле тяготения велико сравнительно с полем вблизи Земли. Эйнштейн рассчитал, что луч звездного света, проходя вблизи Солнца, должен испытывать отклонение от прямолинейного пути на 1,75 угловых секунд. Этот вывод теории Эйнштейна был подтвержден во время полного солнечного затмения 29 мая 1919 года, когда две английские экспедиции — одна на западном побережье Африки, а другая в северной части Бразилии — получили фотографии звезд, видимых вблизи закрытого солнечного диска.

Теория Эйнштейна предсказала также смещение к красному концу спектра спектральных линий излучения, проходящего в поле тяготения звезд; это смещение особенно заметно при прохождении излучения вблизи звезд, обладающих большой массой, где, следовательно, поле тяготения велико. Теория дала расчет и точной величины вращения траектории Меркурия.

Вообще теория тяготения Эйнштейна точнее, чем теория Ньютона, отображала процессы в области сильных полей при наличии быстродвижущихся масс.

Таким образом, несмотря на огромную абстрактность, чуждую мышлению многих физиков того времени, теория Эйнштейна оказалась плодотворной, она подвинула знание природы вперед. Именно в этом сочетании абстрактности и плодотворности лежит причина исключительной мировой славы Эйнштейна как ученого. После подтверждения предсказаний обобщенной теории тяготения об Эйнштейне заговорили как об ученом, который одной только силой своего мышления раскрывает неизвестные до того тайны природы.

Но одновременно успех теории утвердил Эйнштейна в его теоретико-познавательных взглядах. Разработка теории относительности и теории тяготения убедила Эйнштейна в том, какое огромное значение имеет *теория*, *взятая в целом*.

Несомненно, что он убедился в этом в ходе исследований, то есть уже в первом и втором десятилетии нашего века. Позднее, в своем «Ответе на критику» Эйнштейн дважды возвращается к объяснению своей позиции по этому вопросу. На критику Рейхенбаха он отвечает в форме диалога между Рейхенбахом и неким Не-позитивистом(!), и от имени последнего ставит вопрос: «А почему отдельные встречающиеся в теории понятия вообще требуют какого-то отдельного оправдания, если они необходимы только в рамках логической структуры теории и *теория утверждается только в своей целостности?*»

А по поводу упрека Бриджмена в отходе от операционализма Эйнштейн еще более точно определяет свою позицию: «Чтобы логическая система могла рассматриваться как физическая теория, нет необходимости требовать, чтобы все ее утверждения могли толковаться независимо

и чтобы они могли быть независимо «проверяемы» «в операционалистском смысле», *фактически* это никогда еще не было выполнено ни в одной теории, да и не может быть выполнено вообще. Чтобы некоторую теорию можно было рассматривать как *физическую*, необходимо только, чтобы она вообще заключала в себе эмпирически проверяемые утверждения» (курсив Эйнштейна).

Итак, реформа классической (ньютоновой) теории тяготения, проведенная Эйнштейном под углом зрения увязывания физических понятий в единой теории (обобщенной теории тяготения), привела к положительным результатам и подтвердила роль *теории как целостности*. Разъясняя позже фактически реализованную им линию, Эйнштейн уже в явной форме подчеркивает это значение теории.

#### ОЦЕНКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЗАКОНА КАК ЕДИНСТВЕННОЙ ФОРМЫ ПРИЧИННОСТИ

Континуум Эйнштейна с его римановой метрикой явился более обобщенным образом объективной реальности, чем ньютоновы представления, согласно которым разделенные расстоянием массы действовали друг на друга далекодействующими силами, обратно пропорциональными их взаимному расстоянию. Обобщение Эйнштейна явилось успешной попыткой удалить из теории Ньютона некоторые ее слабые стороны, например представление о далекодействующих силах, о независимости метрики и законов движения и другие.

Но вместе с тем Эйнштейн рассматривал себя вовсе не как ниспровергателя классической физики, а только как *реформатора ее, совершенствующего ее основы*.

В теории Ньютона он видел и такие существенные стороны, которые, по его мнению, *должны были остаться неизблевыми во всякой будущей теории*, какие бы общие формы она ни принимала. Он видел гениальность Ньютона в том, что этот основатель классической физики в своих законах движения сумел выразить количественным образом взаимосвязь каждого состояния движения тела в данный момент с его состояниями в предшествующий

момент в смежной точке пространства и в последующий момент в другой смежной точке. Пространство, время и движение в физике Ньютона выступали как непрерывные сущности, а связи между состояниями выражались в форме дифференциальных уравнений. Величайшая заслуга Ньютона состояла в том, что он открыл метод дифференциального исчисления, однозначно определяющий взаимосвязи состояний тела в его движении. В ньютоновых дифференциальных уравнениях движения Эйнштейн видел «удовлетворение потребности современных физиков» в причинной связи. Естественно, что заслугу открытия математической формы причинной связи он целиком относил к Ньютону.

В статье «Механика Ньютона и ее влияние на форму теоретической физики» (1927) Эйнштейн писал: «...До Ньютона не существовало законченной системы физической причинности, которая была бы в состоянии как-то передать основные черты опытного мира». Законы Кеплера, разъяснял он дальше, давали ответ на вопрос о том, как движутся планеты, но они не удовлетворяли потребности показать причинную зависимость; эти законы выступали как три логически независимых друг от друга правила, «лишенные всякой внутренней связи». Только Ньютон, создав дифференциальное исчисление, дал необходимую форму закону причинной взаимосвязи. *«Дифференциальный закон, — писал там же Эйнштейн, — есть та е д и н с т в е н н а я ф о р м а, которая полностью удовлетворяет потребность современных физиков в причинности.* Ясная концепция дифференциального закона есть величайший духовный подвиг Ньютона». Не столь существен спор о том, кто первый открыл дифференциальное исчисление — Ньютон или Лейбниц, но существенно то, что для Ньютона открытие дифференциального исчисления было *необходимостью* именно потому, что оно, по Эйнштейну, является адекватной формой причинной связи. Полная причинная концепция была получена после того, как наряду с уравнением движения была дана сила, действующая на массу и определяемая положением всех других масс.

Теория относительности («специальная») не только опиралась на ньютонову динамическую трактовку

причинности, но и уточнила ее в одном отношении: она указала, что события  $M$  и  $N$  могут находиться в причинно-следственном отношении друг к другу лишь в том случае, если эти события разделены промежутком времени, достаточным для передачи действия от места события  $M$  до места события  $N$  с конечной скоростью, не превышающей скорости света. Это уточнение вводит фактор действия между событиями  $M$  и  $N$  и подчеркивает связь пространства и времени в одном континууме. Уточненная теорией относительности формулировка причинности использована в ней в качестве исходного пункта для анализа важнейшего понятия теории — одновременности.

Из сказанного следует, что *классическое представление о причинной связи органически входит в самую структуру теории относительности.*

Теория тяготения Эйнштейна в этом отношении не отличается от его теории относительности. И там, и здесь физические процессы выражаются как процессы, происходящие в континууме — некотором *непрерывном пространственно-временном образовании*; только в теории относительности этот континуум имеет евклидову (точнее, псевдоевклидову) метрику, а в теории тяготения — риманову. И там, и здесь уравнения движения представляют собой дифференциальные уравнения, связывающие между собой смежные в пространстве и времени события (в «Эволюции физики» эти уравнения названы «структурными»). Континуумы Эйнштейна с различной метрикой описываются дифференциальными уравнениями в *частных* производных, что характерно для описания процессов, происходящих в поле. Эти континуумы и представляют собой некоторый непрерывный «полевой» образ.

Бесконечно малые непрерывные изменения аргументов в уравнениях с частными производными в принципе ничем не отличаются, как казалось Эйнштейну, от бесконечно малых изменений аргументов в уравнениях с обычными производными. Поэтому Эйнштейн полагал, что его теория тяготения сохраняет неизменными классические представления о физической причинности, согласно которой однозначно связываются события, бесконечно близкие друг к другу в пространстве и во времени. Более того, поскольку созданная им теория тяготения по своей структуре

наиболее совершенна, классическая форма причинной связи представлялась ему всеобщей.

Успешные предсказания теории тяготения должны были утвердить его в этом убеждении.

### РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПУТИ ПОСТРОЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Итак, профессиональный опыт Эйнштейна утверждает его в мысли, что понятия органически связаны с теорией, через нее получают свое содержание и оправдание. А теория отражает мир лишь как целое.

Возникает вопрос: как же строится сама теория?

Мах, служивший Эйнштейну примером критика абсолютных категорий ньютоновой физики, отвечал на этот вопрос просто. Понятие — чисто психическое образование. Характерная черта понятия — это воспоминание о каком-либо постоянном комплексе восприятий и выделение в нем главных восприятий, по которым вспоминается весь комплекс (абстрагирование, по Маху). Научные теории имеют своей целью «упорядочить» множество фактов восприятий, которые без такого упорядочения невозможно удержать в памяти. Уже в таком процессе, как падение тела, содержится множество фактов восприятий, ибо *каждому* мгновению времени соответствует *своя* высота падающего тела. Чтобы обзреть все эти соответствия, пришлось бы составить бесконечную таблицу. Но такую таблицу нельзя ни исчерпать, ни удержать в памяти! На помощь приходит *упорядочивающая* теория; она сжимает бесконечную таблицу в одну формулу  $S = gt^2/2$ , дает правило, по которому мы всегда можем найти путь  $S$ , пройденный падающим телом, для любого заданного момента. «Но это правило, эта формула, этот «закон», — писал Мах в своем раннем труде «Принцип сохранения работы», — *вовсе не имеет более существенного значения, чем все отдельные факты, вместе взятые*. Все значение его заключается только в удобстве применения. Оно имеет экономическое значение».

Итак, теория, по Маху, не заключает в себе ничего более, чем все отдельные «факты восприятия», она есть

только экономя запись их ради облегчения памяти. Эйнштейн не мог пойти в этом вопросе за Махом. Он уже увидел в теории нечто большее, чем только сжатую запись «фактов восприятий»: она дает «картину мира», его связи, которые *непосредственно в фактах восприятий усмотреть нельзя*.

Не дает этой картины и теория, построенная на физических экспериментах. Пример такой теории Эйнштейн усматривал в теории тяготения Ньютона. Она дала многое, но ведь Эйнштейну пришлось ее реформировать, поскольку она содержала много понятий, не нужных для обобщенной совершенной теории. Такая теория хотя и имеет «внешнее оправдание», поскольку опирается на опыт, но она внутренне несовершенна.

Необходимость преобразования классической теории тяготения и успешный опыт построения новой реформированной теории подсказывали ему вывод: непосредственный опыт не ведет к однозначной теории. Эйнштейн уже давно пришел к этому выводу и руководствовался им в теоретической работе, но наиболее резко сформулировал его в «Творческой автобиографии», в которой обозревал пройденный путь: *«Теория тяготения научила меня и другому: собрание эмпирических фактов, как бы обширно оно ни было, не может привести к таким сложным уравнениям (поля тяготения.— С. С.). На опыте можно проверить теорию, но нет пути от опыта к построению теории» \**).

Здесь мы видим и прямую ссылку на свой профессиональный опыт, на свой метод построения теории тяготения (значение профессионального опыта мы подчеркивали выше), и резкое отрицание пути от опыта к построению теории. То, что содержит опыт, и взаимные соотношения опытных данных, находят свое выражение только в выводах теории; выводы теории, действительно, должны соответствовать опыту, иначе теория окажется пустой схемой. Опыт выступает лишь как мера оценки теории и лишь после того, как теория создана.

Но если от опыта нет путей к построению теории, то каково же ее происхождение?

---

\*) См. аналогичное высказывание, приведенное на стр. 269.



В лекции «О методе теоретической физики» Эйнштейн говорил: «В том, что такое отражение (опыта — в выводах теории. — С. С.) возможно, состоит единственная ценность и оправдание всей системы, и особенно понятий и фундаментальных законов, лежащих в ее основе. В остальном эти последние суть *свободные изобретения человеческого разума*, которые не могут быть оправданы ни природой этого разума, ни каким-либо другим видом априори». Физик отыскивает такие фундаментальные понятия и законы, которые дальше логически несводимы. «Важнейшая цель теории состоит в том, — продолжал Эйнштейн, — *чтобы этих несводимых элементов было как можно меньше и чтобы они были как можно проще*, однако так, чтобы это не исключало точного отображения того, что содержится в опыте».

Здесь мы видим выражение двух важных гносеологических идей, которые Эйнштейн считал выводом из своего метода построения теории тяготения. Первая идея состоит в том, что понятия и теории суть свободные изобретения разума, вторая — в том, что задача теоретика состоит в отыскании несводимых далее простейших элементов, фундаментальных понятий, которые должны быть положены в основу теории.

Идея о том, что понятия и теории суть свободные изобретения разума, — не случайное высказывание Эйнштейна. Эту идею можно найти почти во всех его работах, в которых обсуждаются методологические проблемы, начиная со статей периода построения теории тяготения, продолжая книгой «Эволюция физики», написанной для массового читателя, и кончая его «Творческой автобиографией».

Несомненно, что идею о том, что понятия и теории суть свободные *изобретения* разума, Эйнштейн противопоставлял кантианской идее об априорности знания, желая подчеркнуть этим, что понятия (например, пространства, времени) создаются не в силу *природы* разума, а благодаря его *деятельности*. Это противопоставление видно из приведенной выше фразы. Но несомненно также, что он противопоставлял эту идею другой идее, а именно, что понятия и теории являются для нас принудительными в той мере, в какой они являются необходимым следствием анализа экспериментального материала, опыта. Не

случайно поэтому против эйнштейновской трактовки понятий и теорий возражали даже друзья Эйнштейна, несогласные с его трактовкой роли опыта. Например, Макс Борн говорил в докладе «Альберт Эйнштейн и световые кванты» (1955): «Сам Эйнштейн не устает подчеркивать, что не существует однозначного логического пути от фактов опыта к теоретическим системам физики; последние, по его мнению, суть дети свободной фантазии. И все же несомненно, что *ценность теории тем выше, наше доверие к ней тем больше, чем меньше в ней свободы выбора, чем больше ее логическая принудительность*».

Успехи в построении обобщенной теории тяготения Эйнштейн относил за счет *правильного подбора фундаментальных понятий*, положенных в ее основу. Но теперь он и несовершенство ньютоновой физики рассматривает как результат *плохого подбора* фундаментальных понятий. Ньютону и его последователям только *казалось*, что они применяют единственно возможные понятия, связанные с опытом. На самом же деле понятия классической физики имеют не опытное происхождение, а все то же свободное творчество разума. Но только обычно этот факт не осознается до конца, что и приводит к несовершенной теории. В уже упомянутой лекции «О методе теоретической физики», развивая идею о том, что Ньютон и его последователи рассматривали понятия и законы классической физики как непосредственно связанные с опытом, Эйнштейн продолжал: «Большинство естествоиспытателей тех времен были проникнуты идеей, что фундаментальные понятия и основные законы физики не были в логическом смысле свободными изобретениями человеческого разума и что они могли быть выведены из экспериментов посредством «абстракции», т. е. логическими средствами». Эйнштейн считает эту идею ошибочной, правда, он сознает, что другого понимания в то время быть не могло. «*Ясное осознание неправильности этого понимания по существу принесла только общая теория относительности (опять профессиональный опыт!—С. С.)*. Эта теория показала, что на фундаменте понятий, *сильно отличающемся от ньютонова*, можно соответствующий круг опытных фактов объяснить даже более удовлетворительным и совершенным образом, чем это было возможно на ньютоновой основе».

Подобную же мысль Эйнштейн высказывает и в «Творческой автобиографии»: «Предрассудок, который сохранился и до сих пор, заключается в убеждении, будто факты сами по себе, без свободного теоретического построения, могут и должны привести к научному познанию. Такой самообман возможен только потому, что не легко осознать, что и те понятия, которые благодаря проверке и длительному употреблению кажутся непосредственно связанными с эмпирическим материалом, *на самом деле свободно выбраны*».

Итак, по Эйнштейну, независимо от того, как Ньютон и его последователи сами понимали истоки теории, фактически они строили ее на фундаменте некоторых свободно выбранных и потому необязательных понятий; это были понятия абсолютного пространства, времени, движения, материальной точки, тяжелой и инертной масс, далекодействующих сил, ускорения, инерции, энергии и т. д.

Выводы теории, построенной на этих понятиях, действительно подтверждались опытом. Но теория оказалась несовершенной. В ней некоторые понятия оказались искусственными, органически несвязанными в развитой затем теории, они были только внешними условиями для теорий. Некоторые другие понятия оказались попарно эквивалентными друг другу.

Теория тяготения Эйнштейна рассматривалась им как попытка создать другую систему фундаментальных понятий, увязанных в единой теории. Эта теория охватывает тот же опыт. Но фундамент ее очищен, выражаясь языком оптиков, от «привидений», а потому связи в ней, ведущие от фундаментальных понятий к опыту, другие. Эта теория отличается от первой своим «внутренним совершенством»; одного критерия «внешнего оправдания» оказывается недостаточно, ибо теорий, отвечающих этому критерию, т. е. охватывающих *одну и ту же совокупность опыта*, может быть *несколько* и, возможно, даже множество.

Эйнштейн говорит об этих критериях неоднократно, в частности, в «Творческой автобиографии», где он признает «недостаточную определенность» своих утверждений в отношении критерия «внутреннего совершенства». Ясно, однако, что поиски критерия теории, отвечающей требованию «внутреннего совершенства», это прежде всего

поиски наиболее совершенного фундамента теории, исходных категорий и законов, на которые она опирается. Мы уже видели выше, каким мыслился этот фундамент: конечных несводимых элементов должно быть как можно меньше и они должны быть как можно проще.

В самой последней своей работе, посвященной методам теоретической физики, — во втором приложении к третьему изданию «Сущности теории относительности» (1950) — Эйнштейн писал: «Одна теория отличается от другой главным образом выбором *«кирпичей»* для фундамента, т. е. ни к чему не сводимых основных понятий, на которых построена вся теория».

Эйнштейн указывает дальше, как менялся фундамент физики: «В классической теории (механика) такими основными понятиями являются: материальная точка, сила взаимодействия между материальными точками (потенциальная энергия) и инерциальная система (последняя состоит из декартовой системы координат и временной координаты). С ростом наших знаний об электромагнитном поле к числу основных понятий наравне с материальной точкой (вещество) прибавилось понятие поля, рассматриваемого как второй носитель энергии». Специальная теория относительности «предполагает далее, что мы можем отбросить концепцию материальной точки и иметь дело только с концепцией поля». Общая теория относительности «вовсе отбросила понятие инерциальной системы».

Основную тенденцию эволюции физики Эйнштейн видит именно в улучшении отбора «кирпичей» для фундамента физики. Это является лейтмотивом его (совместно с Инфельдом) книги «Эволюция физики». До теории относительности, пишут в ней авторы, еще можно было утверждать, что между веществом и полем имеется качественное различие; вещество имеет массу, в то время как поле ее не имеет: поле представляет энергию, вещество представляет массу. Теория же относительности, установив эквивалентность массы и энергии, показала, что вещество отличается от поля лишь большей концентрацией энергии. «Но если это так, то различие между веществом и полем скорее количественное, чем качественное. Нет смысла рассматривать вещество и поле как два качества, совершенно отличные друг от друга». (стр. 200).

На основе качественного отождествления вещества и поля авторы стремятся построить «новую философскую основу» естествознания. Они пишут: «Мы не можем построить физику на основе только одного понятия — вещества. Но деление на вещество и поле, после признания эквивалентности массы и энергии, есть нечто искусственное и неясно определенное. Не можем ли мы отказаться от понятия вещества и построить чистую физику поля? То, что действует на наши чувства в виде вещества, есть на деле огромная концентрация энергии в сравнительно малом пространстве. Мы могли бы рассматривать вещество как такие области в пространстве, где поле чрезвычайно сильно. Таким путем можно было бы создать новую философскую основу (естествознания. — С.С.). Ее конечная цель состояла бы в объяснении всех событий в природе структурными законами, справедливыми всегда и всюду. С этой точки зрения брошенный камень есть изменяющееся поле, в котором состояния наибольшей интенсивности поля перемещаются в пространстве со скоростью камня. В нашей новой физике не было бы места для поля и вещества, поскольку *единственной реальностью было бы поле*» (стр. 201).

Итак, главная физическая концепция Эйнштейна состоит в следующем. Все процессы, происходящие в природе, должны быть выражены в единой полевой теории. Эта теория свободно конструируется разумом на фундаменте свободно отобранных понятий. Теория должна отвечать определенным требованиям: быть внутренне совершенной, связывать события однозначным образом, приводить к выводам, не противоречащим опыту.

#### РАЦИОНАЛИЗМ И КАНТИАНСТВО В ГНОСЕОЛОГИИ ЭЙНШТЕЙНА

Постижение роли теории как целостности, в которой каждая физическая категория играет служебную роль, — большое достижение современной теоретической мысли. Труды Эйнштейна, — впрочем, не одного только его, — сильно способствовали усвоению этой истины.

Но мы видели, что Эйнштейн отрицал путь от опыта к построению теории. Тот путь, который подсказывал

Мах, не мог удовлетворить Эйнштейна. При всей своей высокой оценке маховской критики априорных понятий ньютоновой физики, Эйнштейн не мог принять тезис позитивизма о существовании только мира ощущений, о понятиях как психических образованиях, о теориях как экономической записи все тех же фактов восприятий. Эйнштейн *сам создавал теории* и вовсе не таким путем, какой указывал Мах; весь профессиональный опыт Эйнштейна выражал внутренний протест против маховского опрощения проблемы происхождения понятий и теорий. Он вел к более глубоким выводам. Если образование теории — не такая опрощенная операция с «фактами восприятий» и «комплексами восприятий», как указывал Мах, а *логический процесс*, в результате которого возникает целостная логическая система, выводы которой совпадают с новыми комплексами ощущений, то это действительно вселяет «веру в существование внешнего мира, независимого от воспринимающего субъекта», в то, что и теория, и ощущения выражают именно этот мир.

Но структура этого мира постигается не чувствами, а разумом.

Таким образом, Эйнштейн в своей профессиональной деятельности, как физик-теоретик, подошел ближе к рационализму, чем к позитивизму. Не случайно он высказывал симпатии к выдающемуся рационалисту XVII века — Спинозе. Но, пожалуй, его метод ближе к рационализму старшего современника Спинозы — Декарта.

Как в наше время Эйнштейн брал за образец научного метода геометрический метод Евклида и математики вообще (Эйнштейн говорит об этом и в лекции «О методе теоретической физики» и в «Творческой автобиографии»), так в свое время и Декарт опирался на геометрический метод (как известно, геометрия была профессией Декарта, он положил начало аналитическим методам в ней). В «Рассуждении о методе для руководства разума и отыскания истины в науках» (1637) Декарт писал: «Те длинные цепи простых и легких рассуждений, которыми обычно пользуются геометры, чтобы дойти до своих наиболее трудных доказательств, дали мне случай представить себе, что все вещи, способные стать предметом знания людей, стоят между собою в такой же последовательности.

Если таким образом остерегаться принимать за истинное что-либо, что таковым не является, и соблюдать всегда порядок, в каком следует выводить одно из другого, то нет таких отдаленных вещей, которых нельзя было бы достигнуть, и таких сокровенных, которых нельзя было бы открыть».

В этой рационалистической схеме Декарта все вещи стоят между собой в той же последовательности, что и в геометрии, и в ней логические следствия схемы Декарта совпадают с опытом. Декарт (как и Эйнштейн в наше время) искал исходные предпосылки познания, из которых он мог бы вывести все знание: «Я старался найти принципы или первые причины всего, что существует или может существовать в мире, пользуясь для этой цели рассмотрением бога, сотворившего его, и выводя все лишь из некоторых семян истины, естественно находящихся в нашей душе. Потом я исследовал, каковы первые и самые обыкновенные следствия, которые можно вывести из этих причин: и кажется мне, что таким путем я нашел небо, светила, звезды и на них воду, воздух, огонь, минералы и некоторые другие предметы, наиболее общие и простые, а потому и более доступные познанию».

Как известно, Декарт признал невозможным практически провести эту логическую нить до «самых отдаленных вещей», ибо хотя вещи и стоят между собой в геометрической последовательности, но где-то эта последовательность становится неоднозначной, и какая ветвь из этих последовательностей реализована в природе — человеческий разум логически не может решить. «Следовательно, обратить их (разнообразные частные следствия. — С. С.) в нашу пользу можно, только восходя от следствий к причинам и производя множество различных опытов».

Декарт верил в рациональную структуру мира, но он признал, что отразить ее в мышлении возможно только в принципе, практически же необходимо восходить от следствий к причинам. Позиция Эйнштейна отличается тем, что в этом вопросе он не шел ни на какие компромиссы. Рационализм Эйнштейна отличен от классического и в другом отношении. В классическом рационализме (Декарта) все следствия выводятся из начальных принципов, они развертываются в последовательную цепь, в

которой каждое звено вытекает из предыдущего и каждое из них может быть сопоставлено с реальным миром.

Эйнштейн же исходил из того, что физическая теория представляет собой замкнутую логическую структуру и потому может быть проверена только в целом, в ее конечных выводах. Следовательно, теория не разворачивается в последовательную цепь следствий, в которой может быть проверено каждое звено. До получения конечных выводов исследователь творит теорию чисто логически. Не случайно Эйнштейн всю жизнь настаивал на том, что теория — это свободное изобретение разума.

Что, однако, означают слова «проверка выводов теории»?

При обсуждении *гносеологических* проблем Эйнштейн не выдвигает в качестве решающего критерия познания активное взаимодействие человека с внешним миром, изменение внешнего мира на основе познания. Он сравнивает выводы теории с *миром восприятий*, довольствуясь сознанием того, что восприятия как-то связывают человека с внешним миром. Как относится свободно созданная разумом теория к внешнему миру — это можно судить по тому, как она объясняет, «упорядочивает» мир ощущений, который, несомненно, вызывается в нас внешним миром. Подтверждение последнего факта Эйнштейн видит в том, что наши ощущения имеют «надличный» (или внеличный) характер, т. е. одни и те же ощущения в одинаковых обстоятельствах присущи не одному человеку, а ряду людей.

Таким образом, по Эйнштейну, теория возникает не из опыта, а свободно изобретается разумом на основе более или менее совершенного отбора понятий — «кирпичей» фундамента — и, минуя внешний мир, *накоротко замыкается* непосредственно с миром ощущений, с тем «надличным», что в нем встречается, объясняет и «упорядочивает» его.

Что касается самого внешнего мира, то он представляется Эйнштейну загадкой. Он находит эту идею — мир есть загадка — очень ценной и указывает, что она идет от Канта. В «Ответе на критику» Эйнштейн пишет: «Я не был воспитан в традициях Канта и довольно поздно пришел к пониманию того действительно ценного, что имеется в его



учении, наряду с заблуждениями, которые теперь совершенно очевидны. Оно заключено в утверждении: «реальное нам не дано, а загадано (в виде загадки)». Это, очевидно, означает: для охвата межличного существует умозрительная конструкция, основание которой лежит исключительно в ней самой. Эта умозрительная конструкция относится именно к «реальному» (по определению), и все дальнейшие вопросы о «природе реального» бессодержательны».

Более популярно эта концепция изложена в книге «Эволюция физики». В ней авторы пишут: «Физические понятия суть свободные творения человеческого разума и не однозначно определены внешним миром, как это иногда может показаться. В нашем стремлении понять реальность мы отчасти подобны человеку, который хочет понять механизм закрытых часов. Он видит циферблат и движущиеся стрелки, даже слышит тиканье, но он не имеет средств открыть их корпус. Если он остроумен, он может нарисовать себе некую картину механизма, которая отвечала бы всему, что он наблюдает, но он никогда не может быть вполне уверен в том, что его картина единственная, которая могла бы объяснить его наблюдения. Он никогда не будет в состоянии сравнить свою картину с реальным механизмом, и он не может даже представить себе возможность или смысл такого сравнения. Но он, конечно, уверен в том, что по мере того, как возрастает его знание, картина реальности становится все проще и проще и будет объяснять все более широкий ряд его чувственных восприятий. Он может даже верить в существование идеального предела знаний и в то, что человеческий разум приближает этот предел. Этот идеальный предел он может назвать объективной истиной» (стр. 30).

Теперь перед нами вполне законченная картина мира и путей его познания, как представлял их Эйнштейн. В этой картине, действительно, отведено место всем философским направлениям — реализму (точнее, материализму) и позитивизму, кантианству и рационализму и, несомненно, элементам ряда других философских направлений. Эйнштейн видел в этом достоинство философских взглядов естествоиспытателя, выражение необходимости для него считаться не с «односторонней философской

схемой», а с реальным разносторонним процессом познания.

В этой главе мы проследили, как зарождалась гносеология Эйнштейна из его понимания собственного опыта построения физических теорий. В следующей главе мы рассмотрим вопрос о том, оправдалась ли эта гносеология, когда он стал руководствоваться ею в трактовке уже созданных физических теорий, а также в разработке новых.

### III

#### ГНОСЕОЛОГИЯ ЭЙНШТЕЙНА И РЕАЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ПОЗНАНИЯ. ОПЫТ И ТЕОРИЯ У ЭЙНШТЕЙНА

Итак, в ходе развития теории относительности и обобщенной теории тяготения Эйнштейн выработал некоторое методологическое оружие, теорию познания естествоиспытателя. Напомним вкратце ее основы.

От опыта нет пути к построению теории. Понятия и теории имеют не опытное происхождение, но и не априорное. Они суть свободное изобретение разума, которое оправдывается только в сопоставлении конечных выводов теории с опытом. Естествоиспытатель отбирает минимальное число простейших «кирпичей» для фундамента» и на этом «концептуальном фундаменте» строит внутренне наиболее совершенную теорию. Непосредственная цель теории — упорядочение наших восприятий. Если это достигается, то мы можем полагать, что построенная нами теория в какой-то мере соответствует внешнему, всегда закрытому от нас, миру, соответствует постольку, поскольку восприятия являются следствием протекающих в нем процессов. Такова схема познания Эйнштейна.

Главное, что отличает метод познания Эйнштейна, — это отрицание пути от опыта к построению теории. Вместе с тем это отрицание является наиболее слабым пунктом его гносеологии.

Но, может быть, это отрицание — случайная, хотя и не одиночная, оговорка, критиковать которую было бы делом недостойным? Разве не известно, что Эйнштейн даже в

тот период, когда разрабатывал свои обобщающие теории, опирался на опыт, например на экспериментальный факт равенства тяжелой и инертной масс? Разве Эйнштейн (совместно с Инфельдом) не показал в «Эволюции физики», как под влиянием открытия новых фактов возникают новые представления и понятия, как, в частности, возникло и утвердилось понятие поля — основное в физике Эйнштейна?

Все это несомненно так. И тем не менее ссылка Эйнштейна на опыт отнюдь не изменяет обрисованной выше рационалистической схемы его познания, в которой существенным является отбор «концептуального фундамента» и построение теории на его основе. Иначе говоря, отдельные ссылки Эйнштейна на опыт не означают, что его вывод: «нет пути от опыта к построению теории» — случайная для него оговорка. Это станет ясным, если рассмотрим наиболее общую форму связи физической теории с экспериментом и сравнить ее с той ролью, какую опыт играет в трудах Эйнштейна.

Физическое познание начинается с установления некоторых экспериментальных соотношений, определенным образом связывающих физические категории (понятия, величины) друг с другом (причем сущность категорий в этих соотношениях всегда определяется в свете существующих теорий). Эти экспериментальные соотношения могут казаться (опять-таки в свете существующих теорий) даже противоречащими друг другу. Но поскольку они представляют собой проявления одного и того же типа объектов, необходимо возникает задача: найти логическое условие их совместности, обобщить их. Следовательно, сущность обобщения такого рода состоит в рассмотрении экспериментальных фактов *совокупно*, как *единой логически связанной системы*, в отыскании *условий совместности результатов различных экспериментов*. В физике эти условия формулируются в виде математических уравнений или неравенств. Их отыскание, разумеется, трудный и подчас болезненный процесс, иногда затягивающийся на долгие годы. Результатом этого процесса и является *теория*.

Отношение между совокупностью экспериментальных фактов и теорией взаимно. Иначе говоря, теория должна

схемой», а с реальным разносторонним процессом познания.

В этой главе мы проследили, как зарождалась гносеология Эйнштейна из его понимания собственного опыта построения физических теорий. В следующей главе мы рассмотрим вопрос о том, оправдалась ли эта гносеология, когда он стал руководствоваться ею в трактовке уже созданных физических теорий, а также в разработке новых.

### III

#### ГНОСЕОЛОГИЯ ЭЙНШТЕЙНА И РЕАЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ПОЗНАНИЯ. ОПЫТ И ТЕОРИЯ У ЭЙНШТЕЙНА

Итак, в ходе развития теории относительности и обобщенной теории тяготения Эйнштейн выработал некоторое методологическое оружие, теорию познания естествоиспытателя. Напомним вкратце ее основы.

От опыта нет пути к построению теории. Понятия и теории имеют не опытное происхождение, но и не априорное. Они суть свободное изобретение разума, которое оправдывается только в сопоставлении конечных выводов теории с опытом. Естествоиспытатель отбирает минимальное число простейших «кирпичей» для фундамента» и на этом «концептуальном фундаменте» строит внутренне наиболее совершенную теорию. Непосредственная цель теории — упорядочение наших восприятий. Если это достигается, то мы можем полагать, что построенная нами теория в какой-то мере соответствует внешнему, всегда закрытому от нас, миру, соответствует постольку, поскольку восприятия являются следствием протекающих в нем процессов. Такова схема познания Эйнштейна.

Главное, что отличает метод познания Эйнштейна, — это отрицание пути от опыта к построению теории. Вместе с тем это отрицание является наиболее слабым пунктом его гносеологии.

Но, может быть, это отрицание — случайная, хотя и не одиночная, оговорка, критиковать которую было бы делом недостойным? Разве не известно, что Эйнштейн даже в

тот период, когда разрабатывал свои обобщающие теории, опирался на опыт, например на экспериментальный факт равенства тяжелой и инертной масс? Разве Эйнштейн (совместно с Инфельдом) не показал в «Эволюции физики», как под влиянием открытия новых фактов возникают новые представления и понятия, как, в частности, возникло и утвердилось понятие поля — основное в физике Эйнштейна?

Все это несомненно так. И тем не менее ссылка Эйнштейна на опыт отнюдь не изменяет обрисованной выше рационалистической схемы его познания, в которой существенным является отбор «концептуального фундамента» и построение теории на его основе. Иначе говоря, отдельные ссылки Эйнштейна на опыт не означают, что его вывод: «нет пути от опыта к построению теории» — случайная для него оговорка. Это станет ясным, если рассмотреть наиболее общую форму связи физической теории с экспериментом и сравнить ее с той ролью, какую опыт играет в трудах Эйнштейна.

Физическое познание начинается с установления некоторых экспериментальных соотношений, определенным образом связывающих физические категории (понятия, величины) друг с другом (причем сущность категорий в этих соотношениях всегда определяется в свете существующих теорий). Эти экспериментальные соотношения могут казаться (опять-таки в свете существующих теорий) даже противоречащими друг другу. Но поскольку они представляют собой проявления одного и того же типа объектов, необходимо возникает задача: найти логическое условие их совместности, обобщить их. Следовательно, сущность обобщения такого рода состоит в рассмотрении экспериментальных фактов *совокупно*, как *единой логически связанной системы*, в отыскании *условий совместности результатов различных экспериментов*. В физике эти условия формулируются в виде математических уравнений или неравенств. Их отыскание, разумеется, трудный и подчас болезненный процесс, иногда затягивающийся на долгие годы. Результатом этого процесса и является *теория*.

Отношение между совокупностью экспериментальных фактов и теорией взаимно. Иначе говоря, теория должна

быть таким обобщением экспериментально установленных соотношений, что из нее при определенных условиях должны вновь возникать те же соотношения, которые привели к образованию теории. Но этого требования для подлинной теории недостаточно. Теория не просто суммирует экспериментальные соотношения, которые стали известны исследователю, но она (в полную противоположность Маху) *выходит за их пределы*, раскрывая через них объективные связи природы. И если эти объективные связи действительно раскрыты правильно, то теория неизбежно приведет к раскрытию и таких соотношений, которые существуют в природе объектов, но еще не были известны исследователю. В этом заключается эвристическое значение теории. Она не пассивно суммирует уже известный опыт, а *дает новое знание, расширяет возможности опыта*. Теория есть нечто большее, чем простая сумма единичных опытов.

Именно поэтому в марксистской философии теория с полным основанием рассматривается как *образ* объективной реальности.

Указанный путь обобщения узловых экспериментов есть наиболее общий и глубокий путь образования теории. Он фактически и реализуется во всех плодотворных физических теориях, хотя это не всегда осознается. Таким именно путем создавалась квантовая механика, на чем мы еще остановимся дальше, а также и теория относительности («специальная»). И такое обобщение фактически реализовал сам Эйнштейн, который в те годы еще не выработал своей особой концепции познания и шел стихийным путем. Не следует забывать, что Эйнштейн отталкивался от классической теории Максвелла, в которой уже были обобщены экспериментальные факты в области электромагнетизма, установленные его предшественниками. Но она оказалась неполным обобщением, необходимо было учесть еще и такие факты, как симметричность (относительность) электромагнитных взаимодействий и независимость скорости света от движения его источника. Это дальнейшее обобщение и выполнил Эйнштейн, что и привело его к теории относительности.

Подобный путь обобщения труден, но он единственно возможен, и он всегда плодотворен по своим результатам.

Мы не можем здесь входить в детальное рассмотрение так понимаемой теории и ее связи с экспериментом, но отметим еще два существенных момента.

Условие совместности данной совокупности экспериментов всегда *однозначно*, как это и подобает теорией-образу объективной реальности. Могут получиться различные *формы* теории; при уточнении они оказываются *эквивалентными*, как это было, например, в отношении матричной и волновой форм квантовой механики. Процесс обобщения, приведший к теории относительности («специальной»), был настолько однозначен, что к его результату продвигался не один Эйнштейн, но и другие физики, в особенности Лоренц, Пуанкаре. Лоренц вопреки личным симпатиям, как свидетельствует Макс Борн, был вынужден отказаться от механистической идеи о существовании особого носителя электромагнитных процессов — эфира; он же, как известно, вывел существенные для теории относительности уравнения преобразований, получившие его имя, и вынужден был ввести в инерциальных системах «местное время», хотя и не понимая его смысла. Пуанкаре всего несколькими месяцами позже Эйнштейна опубликовал статью «О динамике электрона» (1906), в которой, по существу, были все необходимые элементы теории относительности. Словом, экспериментальные факты в начале нашего века с неизбежностью подводили всех физиков к однозначному теоретическому обобщению — теории относительности.

Далее. Теория, являющаяся формулировкой условий совместности экспериментальных фактов, в силу своей природы опирается только на установленные экспериментальные соотношения и не предполагает заранее никаких определенных представлений о свойствах объекта или определенных типов связей, действующих в объекте. Последние могут быть получены лишь в результате отыскания условий совместности экспериментов, то есть в результате выработки физической теории. Это очень важное свойство данного метода образования теорий: метод не связывает исследователю никаких априорных представлений ни об объекте, ни о действующих в нем связях; в силу этого он является *необходимым и единственным способом раскрытия в объекте новых свойств и нового типа*

*связей*, притом его выводы реализуются с принудительной силой, часто вопреки навыкам и психологическому сопротивлению исследователя.

Рассмотрим теперь ту роль, которая отведена опыту в схеме познания Эйнштейна. Эта роль двоякая. Об одной из них Эйнштейн говорит ясно: выводы теории должны совпадать с опытом, без этого теория превращалась бы в пустую схему. Это положение бесспорно. Но это — апостериорная, контрольная функция опыта. Она отбирает адекватные объекту теории среди всех созданных, содействуя тем самым развитию науки в целом, но не ведет непосредственно к построению теории. Опыт играет в схеме Эйнштейна и другую роль. В схеме построения теории Эйнштейна нетрудно заметить два этапа: в первом он конструирует «концептуальный фундамент», а во втором — создает на его основе теорию. Но откуда он берет понятия для «фундамента»? Эйнштейн утверждает, что понятия (как и теория) — продукт свободного изобретения разума. Но, конечно, он не придумывает их произвольно, а фактически *отбирает*, отбирает среди тех, которые по каким-то основаниям уже возникли в физике. Мы не будем здесь исследовать этот процесс возникновения понятий и их последующего закрепления или же отклонения. Эйнштейн (и Инфельд) показал этот процесс в «Эволюции физики».

В возникновении физического понятия опыт играет определенную (однако не непосредственную, не в смысле позитивизма или операционализма) роль. У Эйнштейна он играет роль и в отборе понятий для «концептуального фундамента» (равенство тяжелой и инерциальной масс). *Но это совсем не та роль, какую играет опыт, когда отыскивается единственно возможное условие совместности экспериментов.* Эйнштейн прав: та роль, какую он сам отводит опыту, не дает ему возможности найти пути от опыта к построению теории. Она вполне совмещается с концепцией теории как продукта свободного изобретения разума, со всеми вытекающими отсюда следствиями, а именно, что одни и те же факты могут отображаться разными теориями, что одна теория отличается от другой различными «концептуальными фундаментами», положенными в основу теории, что помимо критерия «внешнего оформ-



дания» теории существует еще критерий «внутреннего совершенства» и т. п.

Идея множественности теорий, отображающих одни и те же факты, но отличающихся тем, что они построены на основе различных «концептуальных фундаментов», не подтверждается реальным процессом познания. Нет оснований считать, что две теории тяготения — Ньютона и Эйнштейна — относятся к одному и тому же кругу фактов, но только по-разному их «упорядочивают», поскольку первая имеет несовершенный «концептуальный фундамент», а вторая — совершенный. Классифицировать эти теории приходится по-иному.

Обе эти теории стоят не рядом друг с другом, как неоднократно подчеркивал Эйнштейн, а в определенном отношении друг к другу, и вторая охватывает более широкий круг фактов, чем первая. Теория тяготения Ньютона справедлива только для скоростей, малых сравнительно со скоростью света, и потенциалов, малых сравнительно с квадратом скорости света. Обобщенная теория тяготения Эйнштейна охватывает также и области больших скоростей и потенциалов, а при малых их значениях принимает форму ньютоновой теории. Обе теории представляют собой *различные ступени углубления познания природы*. Нельзя, следовательно, утверждать, что «концептуальный фундамент» и сама теория свободно конструируются разумом. Замечание Борна по этому поводу (см. стр. 288) было справедливым.

По существу, той же цели оправдания свободной творческой деятельности разума служит и идея о том, что мир есть и навсегда будет для нас загадкой. Если «корпус мирового механизма» наглухо закрыт от нас и никогда не раскроется, то предъявляемые к теории требования становятся не столь жесткими, поскольку «внешнее оправдание» ее конечных выводов фактически сводится при этом только к «упорядочению» наших восприятий. Эта концепция лишает теорию однозначной достоверности, что неоднократно признавал и Эйнштейн (см. его высказывания, приведенные на стр. 288, 290, 295).

Но реальные знания человека развиваются вовсе не так: сегодня нет никаких теорий, а завтра будет теория, охватывающая весь замкнутый в себе мир, «корпуса

механизма» которого мы вскрыть никогда не сможем. Человек создает теории, относящиеся не к миру как целому, а к отдельному кругу явлений природы. При этом он *непрерывно взаимодействует с природой* как до создания теории, так и после. Он создает теорию на основе взаимодействия и проверяет свои теоретические выводы о ней через взаимодействие, через практику. В результате этого человек непрерывно расширяет и углубляет свои связи с природой. Это и есть процесс познания природы. Это и есть раскрытие «корпуса мирового механизма». Только игнорируя это постоянное взаимодействие с внешним миром, исследователь может утверждать, что его теории — продукт свободного изобретения разума. К чему это игнорирование привело на практике самого Эйнштейна, мы увидим позже, а пока рассмотрим, к какому результату оно приводит в самой теории познания.

В логическом аспекте физическая теория представляет собой некоторую связь физических категорий или понятий. Отобрав «кирпичи» для фундамента», Эйнштейн приступает к построению теории, устанавливая некоторую связь между отобранными понятиями. Но какие же типы связей он использует? Только типы связей, выражаемые дифференциальными уравнениями, для поля — в частных производных. Следовательно, гносеология Эйнштейна исходит из заранее определенного типа причинных связей, приписываемых внешнему миру: это — однозначная непрерывная связь событий, смежных во времени и пространстве. Опора на связи этого типа для Эйнштейна неизбежна, ибо других связей он не знает и ему неоткуда почерпнуть знание о них, поскольку он не рассматривает условия совместности различных экспериментов. Игнорирование этого метода и вынуждает Эйнштейна неявным образом постулировать, что внешний мир подчиняется связям именно указанного типа.

Выходит, что априоризм, правомерность которого Эйнштейн подверг справедливой критике, стремясь освободить от него классическую физику, выступает в теориях Эйнштейна в новой форме: теперь априорный характер приобретают уже не отдельные физические категории, а *определенный тип закономерных связей*, характерный для классической физики.

Но откуда следует, что мир должен подчиняться именно тому типу связей, который известен исследователю в период разработки им теории или по каким-то причинам наиболее близок его духу? А что, если внешний мир и в самом деле обладает закономерностями иного типа? Как получить об этом информацию? Не выступает ли здесь принятый метод познания как препятствие познанию?

Это именно так и есть. Это — противоречие, но оно неизбежно для рационализма, как классического, так и современного. Но классический рационализм для своего времени был прогрессивным течением, поскольку он выступал против догм, утверждавших, будто истина дана только в церковных книгах, и выдвигал идею, что творческий разум человека в состоянии прочесть ее в книге самой природы. В наше время богословские догмы преодолены, и рационалистическая философия лишь тормозит познание: она не в состоянии раскрыть в природе связи нового типа.

Итак, Эйнштейн признавал опыт, но он недооценивал его гносеологическое значение, его существенную роль в построении теории. Он использовал опыт так, что допускал возможность множественности теорий, описывающих один и тот же круг фактов, и исключал возможность познания объективных связей и свойств нового типа.

В последующих разделах мы рассмотрим метод Эйнштейна в действии.

### МЕТОД ЭЙНШТЕЙНА В ДЕЙСТВИИ. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ИЛИ ОБОБЩЕННАЯ ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ?

Как уже сказано выше, теория относительности («специальная») явилась результатом обобщения экспериментальных фактов. Однако Эйнштейн по-своему истолковал причины ее появления. В свете сложившейся у него общей концепции он стал рассматривать ее как результат не обобщения экспериментальных фактов, а устранения из физики исключительности одной («абсолютной») системы отсчета. К этому толкала его и маховская

критика основ ньютоновой механики, критика, которая в то время стала популярной среди физиков. Устранение из физики абсолютной системы отсчета, действительно, имело место. Но все дело в том, что не теория появилась в результате этого устранения, а оно само явилось существенным *результатом теории*.

Пока дело касается одной, исходной теории, спор о том, что является в ней основой, а что следствием, может показаться схоластическим. Принципиальное различие позиций выясняется при построении новых теорий, когда избранная позиция становится руководящим методом поиска.

Так произошло и в данном случае. Произведенный Эйнштейном переворот реальных соотношений в оценке причин возникновения теории относительности многим показался естественным и убедительным. Самого Эйнштейна он привел к развитию специфической для него методологии, из которой прямо вытекала задача дальнейшего упорядочения «концептуального фундамента» теории.

Она возбудила в нем стремление расширить смысл принципа относительности, сформулировав его как *общий принцип относительности*, охватывающий любые (и ускоренные) системы отсчета; этот принцип он стал рассматривать как важную веху на пути построения рациональной физики.

Но в этой стадии методология Эйнштейна вступила в свой первый конфликт с физикой.

Рассмотрим логику его устремлений и полученные им результаты.

Как сказано выше, Эйнштейн исходил из того, что принцип относительности устранил из физики идею об особом положении некоторой (единственной) абсолютной системы отсчета, в которой формулируются законы физики. Он считал это большим достижением, но все же неполным. На место одной выделенной системы встал целый класс систем, а именно инерциальных. Все физические процессы в нем протекают одинаково, но все же это — особый класс: вне его находится класс неинерциальных (ускоренных) систем, в которых процессы протекают неодинаково.

Выделение некоторого класса систем (инерциальных) в особую категорию нарушало логическую стройность

физического мышления. Эйнштейн полагал, что так же как нет одной исключительной (абсолютной) системы, так не должно быть и целого класса исключительных систем — инерциальных. Такая ситуация не соответствует и методологическому требованию Эйнштейна, чтобы теория была «внутренне совершенной». Встает задача: в формулировке физических законов освободиться от учета того, что приносят в них неинерциальные системы, найти единую форму для выражения физических законов, независимую от класса систем отсчета. Как же это осуществить?

Две теории, созданные Эйнштейном, подсказывают путь к этому — теория относительности и обобщенная теория тяготения. Развивая теорию относительности (принцип относительности для инерциальных систем), Эйнштейн пришел к образу пространственно-временного континуума. Метрика этого континуума имеет псевдоевклидов характер. В этой псевдоевклидовости отражены свойства класса инерциальных систем. Формулируя обобщенную теорию тяготения, Эйнштейн включил поля тяготения в континуум посредством изменения его метрики. Оперирование с метрикой континуума упростило «концептуальный фундамент», освободило его от ряда понятий (дальнодействующие силы, инерциальное движение и т. п.). Законы движения в этом континууме физики уже научились выражать в общековариантной форме. Возникает вопрос: нельзя ли влияние *неинерциальных* систем на движение учесть тем же методом — через пространственно-временной континуум путем соответствующего подбора его метрики? Если бы это удалось сделать, то проблема неинерциальных систем была бы снята, физика имела бы дело только с метрикой континуума, в котором закон движения выражается в общековариантной форме. Это и означало бы, с точки зрения Эйнштейна, что найден «общий принцип относительности». От сформулированного прежде «специального принципа относительности» (как его стал именовать Эйнштейн) «общий принцип относительности» отличался бы тем, что он охватывал бы не только класс инерциальных, но также и класс неинерциальных систем. Другими словами, он утверждал бы, что *относительна не только скорость, но и ускорение.*

Такова была задача, поставленная Эйнштейном.

Но возможность выразить влияние неинерциальных систем на движение через метрику пространственно-временного континуума могла быть обоснована только в том случае, если бы была доказана эквивалентность полей ускорения полям тяготения. На это и было направлено внимание Эйнштейна.

Однако доказательств эквивалентности произвольных, встречающихся в природе, полей ускорения и полей тяготения он не дал. Он указывал на мысленный опыт с закрытым лифтом; наблюдатель в таком лифте не имел бы возможности установить, движется ли его лифт равномерно ускоренно или же он покоится, но находится в поле тяготения: все физические процессы в обеих ситуациях протекали бы одинаково. Но идеализированный опыт с падающим лифтом доказывает эквивалентность только в частном случае специально подобранных *однородных* полей. В общем же случае, например во вращающихся системах, эквивалентность можно принять только для бесконечно малого, сводимого к точке, пространства, в котором поля можно принять за однородные. Иначе это формулируется так: *принцип эквивалентности — локальный принцип*. Для всего конечного пространства, для полей, взятых в целом, эквивалентность нарушается. Принцип неприменим, например, к солнечной системе. Идеализированный опыт с падающим лифтом не может служить аргументом в пользу общего принципа эквивалентности произвольных полей ускорения и полей тяготения.

Неприменимость принципа эквивалентности к конечному пространству вытекает также и из свойств того математического аппарата, посредством которого отображается пространственно-временной континуум. Как известно, он описывается дифференциальными уравнениями в *частных* производных. Такое описание только тогда может быть адекватным физической реальности, когда одновременно определены так называемые граничные или краевые условия. Краевые условия и уравнения в частных производных — неразделимые элементы теоретического отображения физической реальности. Требование краевых условий нельзя игнорировать, это означало бы игнорирование свойств физической системы, взятой в целом,

Но краевые условия для произвольных полей ускорения и для полей тяготения всегда будут различными. Например, во вращающихся системах энергия тел на бесконечности стремится к бесконечности, в то время как силы тяготения на бесконечности стремятся к нулю. Для инерциальных сил вращающейся системы нельзя подобрать в природе эквивалентного поля сил тяготения.

Таким образом, идея включить влияние произвольных ускоренных систем в пространственно-временной континуум путем соответствующего подбора его метрики, аналогично тому как это делалось для полей тяготения, не могла быть осуществлена, и общий принцип относительности не был доказан. Это означает, что ускоренные системы реально влияют на ход физических процессов, в них происходящих. Ускорение не относительно, как скорость, а абсолютно.

Возможность же выражения законов движения в ковариантной форме сама по себе еще не влечет за собой утверждения общего принципа относительности \*).

Однако Эйнштейн стремился построить рациональную физическую теорию в духе своих методологических идей. Исключительность инерциальных систем, в которых действует принцип относительности, наличие ускоренных систем, в которых он не действует, — это не отвечало духу рациональной физической теории. Ему казалось, что имеется достаточно оснований признать ускорение столь же относительным, как и скорость. Из этого последовал и парадоксальный вывод о равноправности систем (и даже воззрений!) Птолемея и Коперника.

Такое утверждение имеется и в книге «Эволюция физики». Авторы выражают его в очень яркой форме, пытаются обосновать новейшими физическими открытиями. А по существу их формулировка далеко выходит за пределы собственно физических утверждений.

В этой книге Эйнштейн и Инфельд пишут: «Можем ли мы сформулировать физические законы таким образом, чтобы они были справедливыми для всех систем координат, не только для систем, движущихся прямолинейно и рав-

\*) Эти проблемы обстоятельно рассмотрены в книге В. А. Фока, Теория пространства, времени и тяготения, изд. 2-е, Физматгиз, 1961.

номерно, но и для систем, движущихся совершенно произвольно по отношению друг к другу? Если это можно сделать, то наши трудности будут разрешены. Тогда мы будем в состоянии применять законы природы в любой системе координат. *Борьба между воззрениями Птолемея и Коперника, столь жестокая в ранние дни науки, стала бы тогда совершенно бессмысленной.* Любая система координат могла бы применяться с одинаковым основанием. Два предложения — «Солнце покоится, а Земля движется» и «Солнце движется, а Земля покоится» — означали бы просто *два различных соглашения о двух различных системах координат.* Могли ли бы мы построить реальную релятивистскую физику..., в которой имело бы место не абсолютное, а лишь относительное движение? *Это, в самом деле, оказывается возможным!* (стр. 176).

Нетрудно понять, что эти «аргументы» против прогрессивного воззрения были широко использованы реакционными клерикальными кругами.

Выше уже было показано, что физических оснований для утверждения о равноправности систем Птолемея и Коперника не существует, а так называемая «общая теория относительности» на самом деле есть обобщенная теория пространства, времени, тяготения. Что касается *воззрений* Коперника, то их прогрессивная роль в борьбе за развитие науки, против церковной реакционной идеологии вообще не подлежит сомнению.

Борясь против системы Птолемея, Коперник развенчивал идею абсолютности, единственности системы, связанной с Землей. В этом отношении просветительные идеи Коперника имеют принципиально такое же значение, как и критика Эйнштейна в адрес дорелятивистских физиков, признававших абсолютную систему отсчета, связанную с эфиром. Коперник обосновывал справедливость своей системы не догматами, а научными доводами, смысл которых не утрачен и в наше время. Гелиоцентрическая система Коперника стала необходимой предпосылкой для дальнейшего развития астрономии: только на ее основе могли быть открыты известные законы Кеплера, а стало быть, и законы тяготения Ньютона, и далее развиты космогонические гипотезы, опиравшиеся на то, что в нашей планетарной системе существенную роль играет Солнце.



Победа гелиоцентрического воззрения способствовала развитию научного мышления и поражению клерикальной идеологии.

Трудно представить себе, что Эйнштейн, этот выдающийся гуманист нашего времени и искренний противник клерикализма, не понимал прогрессивного значения воззрений Коперника.

И дело, конечно, обстоит не так. Об этом свидетельствует, например, послание Эйнштейна Колумбийскому университету по случаю 410-й годовщины со дня смерти Коперника, написанное в декабре 1953 года, за полтора года до кончины \*). В этом послании Эйнштейн отмечает и вклад Коперника «в освобождение человека от цепей клерикального господства», и тот факт, что «огромное достижение Коперника... проложило путь современной астрономии» и показало несостоятельность «иллюзии о центральном значении самого человека» в космосе.

Идею о равноправности систем (и даже воззрений!) Птолемея и Коперника в устах Эйнштейна можно понять только как результат влияния узко профессиональных тенденций во взглядах самого Эйнштейна. Эти тенденции привели его к утверждению, будто ему удалось теоретически обобщить относительность на все ускоренные системы. Эту идею Эйнштейн оценивал как весьма революционную. Но она была выражена в крайне абстрактной форме, и он, по-видимому, искал такой формы ее изложения, которая дала бы возможность широкой публике почувствовать ее революционный смысл. Отсюда и появилось это парадоксальное объявление борьбы воззрений Птолемея и Коперника как бессмысленной в свете современной науки. А общественный резонанс такой акции ученый, увлекшись профессиональными целями, не сумел предвидеть.

Эта проблема — Птоломей — Коперник — только прискорбный драматический эпизод, о котором пришлось здесь сказать ввиду большого общественного резонанса, который она получила, появившись в трудах маститых ученых, и особенно поскольку она изложена в столь популярной книге.

\*) Опубликовано в 1956 году в сборнике: *Ideas and Opinions by Albert Einstein*, London, 1956.

В теоретическом же плане нас интересует вывод, какой можно сделать из изложенного выше. Он состоит в том, что нельзя устранить из физики разделения систем на различные классы, перейти от «частного» принципа относительности к «общему», доказать относительность ускорения. Правда, для большинства ведущих физиков эйнштейновская трактовка «общего принципа относительности» не представлялась как очевидное противоречие с развитием науки.

Это связано с тем, что в термин «общий принцип относительности» вкладывается не однозначный смысл. Часто его применяют не в смысле относительности ускорений, а в смысле метода включения различных полей в метрику пространственно-временного континуума. Практически и Эйнштейн применял этот термин в том же смысле. Однако тогда возникает вопрос, можно ли, следуя этому методу, исчерпать все свойства природы? Сам Эйнштейн отвечал на этот вопрос положительно: он считал, что весь мир — континуум. Мы рассмотрим этот вопрос позднее. Говорят также о возможном получении из «общей теории относительности» новых выводов для звездной астрономии. Это дело безусловно перспективное. Однако в этом случае фактически речь идет о выводах обобщенной теории тяготения, возможности которой действительно не исчерпаны. Но это развитие теории не есть реализация гносеологических идей Эйнштейна.

Итак, можно признать, что уже на первом этапе «рациональный метод познания» Эйнштейна не дал убедительных доказательств своей правомерности. Но здесь расхождение с реальным процессом познания еще не сказалось со всей очевидностью, не стало доказательным для всех физиков. Однако оно неминуемо должно было сказаться на следующих этапах развития физики.

## КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ И ГНОСЕОЛОГИЯ ЭЙНШТЕЙНА

Можно ли было создать теорию квантовых явлений тем путем, который Эйнштейн признал единственно правильным? Безусловно, нет.

Метод Эйнштейна включал в себя правильное положение о том, что теория отображает определенную совокуп-

ность явлений внешнего мира только как целое, определяя смысл и содержание используемых в ней понятий (физических категорий). Мы помним, что осознание этого факта привело его к отходу от позитивизма Маха и операционализма Бриджмена. Но метод Эйнштейна включал в себя также и требование *предварительного отбора* простейших понятий для «концептуального фундамента», из которого затем должна рационалистическим путем развиваться теория; он заранее предопределял также и тип связей между физическими категориями.

Но как можно было сказать заранее, какие понятия среди выработанных классической физикой могут быть отобраны «для фундамента» и применены в теории квантовых явлений? И можно ли было использовать в ней классический тип связей? Первый период накопления фактов в этой области с несомненностью обнаружил невозможность отбирать заранее исходные понятия и тип связей между ними, чтобы затем строить теорию рационалистическим методом. Это было слишком очевидно. Нужно было искать другой путь к теории. И физики нашли его, не сразу, не без колебаний, конечно.

Если отбросить то субъективное, что приносили и приносят в изложение и трактовку квантовой теории отдельные авторы, и кратко сформулировать объективную суть метода, которым создавалась квантовая механика, то эта суть может быть выражена следующим образом.

В области атомных явлений физики встретились с рядом узловых экспериментальных фактов, необычных и даже странных с точки зрения уже известных классических законов. Исследователь должен исходить из этих экспериментальных соотношений и рассмотреть их совокупно, как единую логическую систему. Он заранее не может делать никаких предположений ни о природе физических объектов и их состояниях, ни о характере их взаимосвязей, заранее не может строить никаких определенных моделей исследуемого мира. Он не отбирает «для фундамента» никаких «наипростейших» понятий и не изменяет их смысла заранее, до образования теории; в каждом *отдельном* эксперименте он просто использует уже сложившиеся понятия, понятия классической

физики. Чем он еще должен руководствоваться, так это положением, что при определенных условиях, — когда квантом действия можно пренебречь, — любая новая теория должна принимать форму уже испытанной классической теории. Это — так называемый принцип соответствия. Но и принцип соответствия не является принципом, навязываемым природе извне, императивно; по существу, он тоже выражает опытный факт — достоверность законов классической физики при определенных, «классических» условиях.

Так в результате обобщения узловых экспериментальных фактов атомной физики устанавливается их логическая взаимосвязь, условие их совместности — квантовая теория. Природу физических объектов и их состояний, равно как и природу их взаимосвязей, физик принимает такими, какими они *оказываются в результатах обобщенной теории*. Они безусловно уже не те, что были в классических теориях; требование соблюдения «условий совместности» новой совокупности экспериментов, то есть новая теория, наложило свой отпечаток на природу категорий и связей между ними. Поскольку созданная таким путем квантовая теория подтверждается и последующими экспериментами и предсказывает новые, еще не встречавшиеся в лабораториях физиков, и, кроме того, удовлетворяет еще и принципу соответствия, она рассматривается как теория, адекватная внешнему миру, так же как адекватными представляются и все ее составные элементы и установленные в ней взаимосвязи.

Таким образом, в области атомных явлений был применен именно такой метод образования теорий, который позволил раскрыть в природе *новое, позволил выйти за пределы уже известных закономерностей, уже известных представлений о физических объектах и их характеристиках*.

В квантовой механике он привел к выводу о том, что физические свойства объекта должны рассматриваться не как абсолютные, присущие объекту *самому по себе*, а лишь как относительные, определяемые взаимодействием объектов в целостной системе. Тем самым устраняются представления классической физики не только о существовании *систем отсчета с абсолютными свойствами*, но

и о существовании *физических объектов с абсолютными свойствами*. В этом смысле квантовая теория продолжает и углубляет деятельность Эйнштейна в области преобразований классических представлений. Квантовая теория обогатила также характеристику *состояния* физического объекта, определяя его по *набору его потенциальных возможностей*.

Точно так же этот метод объективировал *новую форму причинных связей — статистические закономерности*. Последние вытекают здесь *из существования самой теории, подтвержденной практикой*, а не как временная замена «точных» динамических закономерностей, используемая нами в условиях слабости наших знаний.

Здесь для иллюстрации мощности этого метода приведены только некоторые примеры раскрытия нового в природе.

Но такой метод построения теорий и вытекающие из него следствия *никак не укладывались в систему представлений Эйнштейна о структуре мира, о путях его познания, о том, что единственной формой причинной связи в природе могут быть только однозначные связи, отражаемые в «структурных» или дифференциальных уравнениях. Идея континуума, на которую Эйнштейн опирался и в теории относительности, и в обобщенной теории тяготения, и в разработке единой теории поля, совместима только с одним, указанным выше типом причинных связей*.

Все это и привело к тому, что Эйнштейн, исходивший из собственного метода построения теорий, не мог согласиться с основными идеями квантовой физики.

Эйнштейн, конечно, приводил свои доводы против принятия квантовых идей. На первый взгляд они даже кажутся убедительными. Но при более внимательном рассмотрении становится ясным, что они опираются на априорные представления о природе квантовых объектов и процессов, а именно это и не разрешает делать метод рассмотрения условий совместности экспериментальных фактов, приводящий к новой теории, к созданию образа новой объективной реальности.

Возражая Бору, Борну, Паули, Гейтлеру и другим, Эйнштейн в «*Ответе на критику*» указывает на то, что волновая функция не дает *полного* описания распада

отдельного индивидуального атома, так как «не содержит в себе никаких указаний *относительно момента времени распада радиоактивного атома*» (курсив Эйнштейна). А ведь «каждый *прежде всего склонен предположить*, — продолжает он, — что индивидуальный атом распадается в определенный момент времени». В этой постановке проблемы явно обнаруживается априорный подход Эйнштейна: картина процесса обрисована прежде, чем создана теория, с позиции этой «наглядной картины» ведется критика новой теории. Здесь доводы и следствия поставлены «с ног на голову».

Мы помним, что квантовая теория появилась в результате отыскания условий совместности экспериментальных фактов в данной области микроявлений, что она предсказала и новые факты, что она даже переходит в классическую (проверенную!) теорию при «классических условиях», что, следовательно, *она*, а не что-либо иное, не какая-либо «наглядная картина» выступает как адекватный образ физической реальности. И вот эта теория приводит к *иной* «картине» распада атома. Согласно теории (которая является обобщением опыта, многочисленные следствия которой подтверждаются опытом же!) время распада и энергия связаны так, что чем точнее определяется время ( $\Delta t \rightarrow 0$ ), тем неопределеннее становится изменение энергии (соотношение неопределенностей:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ ). Наши представления о «механизме» распада должны меняться, *они должны соответствовать теории*. Это требование не ново, оно аналогично тому, как Эйнштейн в свое время требовал, чтобы наши представления о структуре жидкости соответствовали проверенной теории броуновского движения. На этом основании мы должны были допустить существование атомов и молекул, хотя непосредственно они не наблюдались.

Однако, хотя Эйнштейн в свое время и пришел к выводу о необходимости трактовать теорию как целостность, «механизм» радиоактивного распада он рассматривал не в свете квантовой теории, а на основе привычных представлений, которые для данного случая выступали уже как априорные.

В «Ответе на критику» он изображает небольшую дискуссию между критиком и защитником квантовой меха-

ники («физиком-теоретиком»). В уста последнего он вкладывает следующий довод в защиту квантовых идей: «Утверждение о существовании определенного момента распада имеет смысл, если я могу в принципе определить этот момент экспериментально... Вся мнимая трудность получается потому, что нечто ненаблюдаемое выдается в качестве «реального». (Таков ответ физика-теоретика.)»

Вот этот предполагаемый ответ (несомненно, что такие ответы встречались) Эйнштейн и назвал (см. стр. 266) позитивистским, ведущим к принципу Беркли: существовать значит быть наблюдаемым. Но здесь нет логики. Позитивизм утверждает: существуют *только мои ощущения*, наблюдения, восприятия; они ничего не отражают вне меня («ощущения могут быть похожи только на ощущения же», говорит Беркли). Другое дело утверждение: данному представлению в данной области ничего не соответствует (не соответствует же ничто в реальном мире представлению о черте!). Доводы Эйнштейна против Маха были *убедительны*: атомы были ненаблюдаемы *непосредственно*, но они *были* и они наблюдались *опосредованно*, в частности, через теорию броуновского движения, что и доказал Эйнштейн. Доводы Эйнштейна против квантовой механики *неубедительны* потому, что он хочет заставить верить в существование *такого* ненаблюдаемого, которое *не находит отражения в теории* — образе *физической реальности*, а, напротив того, исключается ею.

Аналогично этому в свое время критиковали соотношение неопределенностей координат и импульса квантового объекта: «Нельзя одновременно точно определить координаты и импульс? Ну, это только при современной технике; в будущем, когда техника усовершенствуется, координаты и импульс можно будет измерить абсолютно точно. Нельзя же ставить пределы нашему познанию!»

Эта критика исходила из того, что координаты и импульс квантового объекта *всегда существуют в определенно точном значении*, вне связи друг с другом, невозможна только процедура одновременно точного измерения этих значений *при современной технике*.

Но такая критика обнаруживает непонимание того, что квантовая теория (эвристическое значение которой Эйнштейн всегда признавал!) в корне изменила наши

представления о квантовом объекте и процессах, происходящих в квантовой области.

Мы помним, какой мощный импульс дал сам Эйнштейн развитию статистических методов физики. Тем не менее всю вторую половину жизни он категорически отрицал их объективный смысл. В письме Максу Борну от 3 декабря 1947 года он писал: «Мою физическую позицию я не могу для тебя обосновать так, чтобы ты признал ее сколько-нибудь разумной. Конечно, я понимаю, что принципиально статистическая точка зрения, необходимость которой в рамках существующего формализма впервые была ясно осознана ведь тобой, содержит значительную долю истины. Однако я не могу в эту теорию серьезно верить, потому что она 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 останутся на теории, в которой закономерно связанными вещами будут не вероятности, а факты, как это и считалось недавно само собой разумеющимся. В обоснование этого убеждения я могу привести не логические доводы, а мой мизинец, как свидетель, то есть авторитет, который не внушает доверия за пределами моей кожи».

Всю жизнь Эйнштейна беспокоила двойственная, корпускулярно-волновая природа квантовых объектов (так называемый «дуализм»). Он, открывший фотонную структуру света, утверждал теперь, что все дискретные образования — элементарные частицы, атомы, фотоны и т. п. — суть сингулярности («особые области») поля, иначе говоря, они должны быть сведены к полю, в котором действуют «структурные уравнения», то есть дифференциальные уравнения, поскольку ничто, кроме них, по Эйнштейну, не является формой выражения причинной связи. Это прежде всего относится к статистической закономерности. Но современная квантовая электродинамика выявляет статистические закономерности и у поля. Дифференциальные уравнения (максвелловы) электромагнитного поля отражают лишь ту его сторону, которая рассматривается в макроскопической электродинамике, то есть закономерности в процессах, в которых существенную



роль играют изменения *средних значений* переменных. В *микрпроцессах* приходится иметь дело с флуктуациями переменных поля около средних значений и с квантованием поля. Поэтому переход к полю не может освободить физику от статистических закономерностей.

Некоторые авторы обсуждают вопрос: не вытекает ли отрицательная позиция Эйнштейна по отношению к квантовой теории из какого-либо прозрения *будущих* путей развития физики, путей, которых еще не видят его соратники, но которые уже раскрылись перед его умственным взором?

Нет, мы видим, что она вытекает из его *методологии*, из его понимания путей построения теории, из его априорной трактовки структуры внешнего мира, из того, что этому миру заранее предопределялся некий тип связей.

Это отношение к квантовой теории появилось у него не в результате *накопления нового экспериментального материала*, ставящего под сомнение основные теории, не в итоге каких-либо собственных или даже чужих достижений. Оно появилось вскоре после построения им обобщенной теории тяготения, успех которой он принял за подтверждение «общего принципа относительности» и за обоснование тогда уже выработанной им рационалистической методологии.

Еще 3 марта 1920 года Эйнштейн писал Максу Борну: «В свободное время я всегда размышлял над квантовыми проблемами с *точки зрения относительности*. Я не думаю, что эта теория может обойтись без континуума. Однако мне до сих пор не удалось придать осязаемый образ моей любимой идее — *понять квантовую теорию с помощью дифференциальных уравнений*, применяя условия для особых решений». А немного ранее в том же году (27 января) он писал Борну: «Меня также очень тревожит проблема причинности. Будут ли поглощение и излучение света квантами когда-либо поняты в смысле полной каузальности или же сохранится статистический остаток? Я должен признать, что у меня отсутствует мужество убеждения. Но я очень, очень неохотно отказываюсь от полной каузальности...».

Мир, по Эйнштейну, представляется только в образе континуума и теория должна выражать его посредством

дифференциальных уравнений, которые являются единственной формой каузальной связи,— таков смысл этих писем. Уже в то время в них ярко отразилась вся методология Эйнштейна. В ней ничего не изменилось до конца его жизни.

Теперь эта методология уже явно встала вразрез с основным развитием физики.

### ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ КАК ГЕНЕРАЛЬНАЯ ЛИНИЯ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ

Эйнштейн не пассивно критиковал квантовую теорию, он стремился найти другую основу физики. Ему казалось, что его собственный опыт построения теории относительности и теории тяготения подсказывает ему верный путь. Надо найти простейший «концептуальный фундамент» и из него рациональным путем развить все законы природы. Вещество, электромагнитное поле, поле тяготения,— не слишком ли много расчленений произвел человек в природе? Природа едина и ее законы должны быть выражены в единой теории.

Эти идеи привели Эйнштейна к выработке собственной генеральной линии развития физики. Можно проследить четыре ступени развития, намеченные Эйнштейном. Первая — формулировка теории электромагнитного поля, инвариантная для всех инерциальных систем, и разработка в связи с этим теории относительности. Вторая — обобщение принципа относительности на все, в том числе и неинерциальные, системы и выработка «общей теории относительности» (точнее — обобщенной теории тяготения). Третья — обобщение полей электромагнитного и тяготения на базе последнего и выработка «единой теории поля». Четвертая — обобщение частиц вещества как сингулярностей (особых областей) поля и выработка единой физической теории внешнего мира-континуума. Все другие физические теории из этой схемы выпадают.

Первые две ступени были пройдены примерно в 1900—1916 годах, и Эйнштейн приступил к выполнению третьего этапа, над которым работал до конца жизни.

Метод обобщения полей в единой теории поля, если не входить в подробности, состоит в следующем.

По Эйнштейну, поле тяготения определяет геометрическую структуру пространственно-временного континуума, создавая в нем определенную метрику; этот континуум задается набором некоторых функций — компонент  $g_{\alpha\beta}$  метрического тензора. В теории тяготения Эйнштейна учитывалось влияние на метрику пространства только тензора энергии-импульса, создаваемого распределением масс. Но электромагнитное поле также создает тензор энергии-импульса, следовательно, и оно должно делать вклад в метрику пространства. Это давало надежду на успех создания единой теории поля. С точки зрения сторонников этой идеи нужно было только отыскать некоторые дополнительные произвольные функции, описывающие негравитационное поле. Однако не существует никаких объективных указаний на то, как осуществить включение этих новых функций. Самим Эйнштейном и другими авторами предложено несколько вариантов, число которых уже превышает два десятка. Путь формального обобщения оказывается неоднозначным.

В силу этого, как справедливо отмечает известный исследователь «пространств Эйнштейна» А. З. Петров, «все существующие «единые теории» не вышли за рамки отвлеченных построений, не привели к сколько-нибудь значительным открытиям или следствиям, допускающим экспериментальную проверку. Их эвристическое значение равно нулю» \*).

Создалась ситуация, напоминающая ту, перед которой в свое время стоял Декарт.

Естественно возникает общий вопрос: правомерна ли сама постановка задачи о создании единой физической теории как конечной цели физики, в чем эта цель состоит и каковы пути ее решения?

По Эйнштейну, она состоит в сведении всех типов закономерностей и всех типов объектов к единой закономерности и к единому объекту — обобщенному геометрическому образу, описываемому непрерывными дифференциальными уравнениями, отражающими однозначную связь компонентов поля. Так Эйнштейн понимал единство

---

\*) А. З. Петров, Основные этапы развития поля гравитации, «Вопросы философии», 11, 1964.

мира, и эта его трактовка в философском аспекте ничуть не глубже механистических трактовок единства мира конца XIX века. Глубже только ее физическая основа.

Но единство мира состоит не в сведении качественных многообразий мира к количественному различию (см. стр. 54—55), а в том, что многообразные качественные образования в мире взаимно связаны друг с другом и переходят друг в друга при определенных условиях. Если физика прошлого века открыла взаимные превращения различных видов энергии, то в наше время она уже открыла взаимные превращения друг в друга элементарных частиц. С каждым годом раскрываются все большие возможности их взаимных превращений. Можно полагать, что взаимопревращения — это всеобщий закон природы.

Наличие закономерных взаимосвязей и взаимопереходов качественных образований в природе естественно приводит к идее о потенциальной возможности создания единой теории, охватывающей по крайней мере все физические процессы в мире. В самом деле, поскольку в этих превращениях одни физические категории переходят в другие, постольку, по-видимому, возможно в перспективе отыскать такую физическую теорию, которая обобщала бы все эти категории в единой логической системе.

Спор, следовательно, может идти не о самой постановке вопроса о единстве мира, а о трактовке смысла единства и о путях реализации единой физической теории. Очевидно, единая теория должна отвечать ряду требований; здесь мы отметим важнейшие условия ее реализации, как они нам представляются.

Ясно, что единая физическая теория может быть получена не путем рационалистического метода обобщения, по Эйнштейну, а путем обобщения, в котором теория появляется как условие совместности разнообразных, но относящихся к единому объекту явлений, или же — для данной задачи — как условие совместности частных физических теорий. Это означает, что, строя единую теорию, нельзя игнорировать те теории, в отношении которых уже установлено, что они отражают некоторые реальные процессы мира, хотя эти теории и не укладываются в рационалистическую схему. Единая физическая теория не может игнорировать, например, закономерности, от-

крытые квантовой теорией, — квантованность микрообъектов и процессов, их двойственную природу, статистические закономерности, определение состояний через потенциальные возможности и т. д.

Учитывать эти закономерности тем более необходимо, что уже сейчас ясно: сам образ поля, в котором Эйнштейн желает найти убежище, вовсе не снимает всех проблем и трудностей, которые он стремится игнорировать или обойти. Поля непрерывны только в макроскопическом масштабе. В микромасштабе поля прерывны, и Эйнштейн сам был пионером в утверждении квантовой структуры электромагнитного поля.

Теория тяготения Эйнштейна разрабатывалась им как неквантовая теория; но она применима для ограниченных областей пространства, нижний предел которых равен  $1,6 \cdot 10^{-33}$  см. «В меньших масштабах существенными должны стать квантовые флуктуации метрики\*»). Этой возможности Эйнштейн не предусматривал. В порядок дня встал вопрос об экспериментальном установлении гравитационных волн. Эйнштейн не исключал возможности их открытия. Но обнаружение гравитационных волн, несомненно, повлечет за собой открытие квантов полей тяготения — гравитонов.

Открытие гравитационных волн и гравитонов, конечно, требует усовершенствования экспериментальных методов. Оно, несомненно, раскроет новую широкую область фактов, как это было при открытии электромагнитных волн. В частности, оно позволит подойти к решению проблемы энергии гравитационного поля, которая в схеме единых теорий не находит своего решения ввиду того, что энергия не находит здесь своего однозначного выражения и зависит от выбора системы координат.

А. З. Петров справедливо отмечает настоятельную необходимость экспериментальных исследований поля гравитации. «Пока теория будет питаться таким скудным фактическим материалом, как это было до сих пор, ни о какой серьезной физической науке в современном значении этого слова не может быть и речи», — пишет

\* ) Я. Б. З е л ь д о в и ч и И. Д. Н о в и к о в, Релятивистская астрофизика, «Успехи физических наук», т. LXXXIV, в. 3, ноябрь 1964.

он. Тот же автор отмечает характерную статистику научных работ, показывающую сильное уменьшение числа работ, посвященных формальной разработке «единых теорий», и, напротив, увеличение числа работ, посвященных проблеме энергии поля, анализу основных посылок теории, их физической обоснованности.

Но что означают этот вывод о необходимости увеличения экспериментальных исследований и эта статистика, характеризующая изменение характера исследований, как не признание того, что новая теория должна явиться результатом не спекулятивных методов, а рассмотрения условий совместности относящихся к проблеме экспериментальных фактов?

Все сказанное означает, что даже проблема гравитационного поля не может быть рассмотрена во всем ее объеме в том аспекте, который предлагает Эйнштейн. Естественно, что этот некантовый аспект не может служить основой для «теории единого поля».

Вообще ни одна какая-либо отдельная теория, — будет ли то теория тяготения (как думал сам Эйнштейн) или же теория элементарных частиц, или какая-либо иная, — не может быть единственной основой единой физической теории. Но, поскольку она может быть только обобщением ряда частных физических теорий, — квантовой механики, квантовой электродинамики, теории элементарных частиц, теории ядра, будущей квантовой теории гравитации и прочих, — очевидно также, что для обобщенной единой теории должен выполняться специфический принцип соответствия, как и для любой обобщенной теории, но, быть может, в какой-то «разветвленной» форме. Это означает, что при некоторых предельных значениях соответствующих характеристических параметров обобщенная физическая теория должна будет принимать форму тех частных теорий, которые послужили исходными элементами для обобщения.

Ясно, что перспективы такого обобщения еще не очень близки. Известно, с какими пока непреодоленными трудностями встретилась квантовая теория полей, которая еще не получила сколько-нибудь законченной формы. Далеко не ясно, достаточно ли вообще известных «узловых теорий», которые могут послужить элементами единой теории. И во всяком случае будет правильным вывод,

что единая физическая теория, отображающая все физические процессы природы, никогда не будет замкнутой и завершённой, так как процесс раскрытия новых свойств природы, так же как и процесс их возникновения, никогда не завершается. Единая физическая теория есть только некоторый идеал, к которому можно и следует стремиться, сознавая, однако, что никакая единая теория не может исчерпать богатство мира.

Идее создания единой теории поля Эйнштейн отдал последние четыре десятилетия своей жизни. А в это время перед экспериментальной и теоретической физикой широким потоком возникали многочисленные актуальные проблемы, появлялись новые теории — квантовая механика, физика ядра, физика элементарных частиц, квантовая электродинамика, физика твердого тела и другие. Эти проблемы не занимали Эйнштейна. В бурном потоке открытий элементарных частиц, полей, взаимодействий нового типа Эйнштейн, по-видимому, не видел никакого материала для размышления физика-теоретика об эволюции физики и ее задачах. Не случайно в книге, посвященной эволюции физики, не освещены проблемы ядерной физики; авторы сами мотивировали это тем, что их интересуют только общие идеи физики (стр. 211). Экспериментальный материал ядерной физики не укладывался в их схему эволюции физических идей. По свидетельству И. Е. Тамма, Эйнштейн в одной из бесед утверждал, что «уже факт существования электрона должен быть достаточным для построения основ общей теории элементарных частиц» \*). Но из этого следует, что эту теорию уже можно было построить в 1905 году — время появления теории относительности. И тот огромный новый материал, который накоплен экспериментальной физикой за последние десятилетия, — открытие многих новых элементарных частиц, в том числе и античастиц, открытие их взаимных превращений и их новых свойств (например, четности, странности), — оказывается, не имеет отношения к общей теории элементарных частиц!

---

\*) И. Е. Тамм, Эйнштейн и современная физика, «Успехи физических наук», т. LIX, в. 1, 1956. Это утверждение относится, по-видимому, к концу тридцатых годов.

Приведенное выше высказывание Эйнштейна, равно как и его отношение к открытиям современной физики, характеризует его рационалистический метод, его крайнюю одностороннюю целеустремленность, его стремление отыскать формальный метод устранения из физики электрона, о котором он в упомянутой И. Е. Таммом беседе сказал, что всегда считал электрон «чужеземцем в стране классической электродинамики». И действительно, эти идеи Эйнштейн высказывал еще в 1909 году в статье «К современному состоянию проблемы излучения».

Выдающиеся физики, друзья Эйнштейна, высоко ценившие его как ученого, относились скептически к его попыткам создать единую теорию поля. Так, из ученого, в котором ранее видели «вождя и знаменосца», Эйнштейн превратился в ученого-одиночку, который не только шел в физике своим путем, но и отрицал ряд основных идей современной квантовой физики, хотя и признавал ее огромные фактические достижения. И отрицал как раз те идеи, развитию которых он сам столь энергично содействовал в ранние годы.

Свое одиночество сознавал и сам Эйнштейн, что он неоднократно отмечал в переписке с друзьями, крупнейшими физиками современности. Он хорошо сознавал и трудности своего пути. Много раз Эйнштейна окрыляла надежда, что наконец-то он достиг своей цели и единая теория поля создана. Но каждый раз он сам находил изъяны в выполненной работе и снова принимался за трудные исследования. Это продолжалось многие десятилетия. Какое же мужество, какую убежденность и силу воли должен был проявить стареющий ученый в этой упорной, но не дававшей желанных результатов, работе!

Вот как сам Эйнштейн характеризовал результаты этой работы в «Автобиографических набросках» (март 1955): «Со времени завершения теории тяготения теперь прошло уже сорок лет. Они почти исключительно были отданы усилиям вывести, *путем обобщения теории полей тяготения*, единую теорию поля, *которая могла бы образовать основу для всей физики*. С той же целью работали многие. Некоторые обнадеживающие попытки я впоследствии отбросил. Но последние десять лет привели, наконец, к теории, которая кажется мне естественной и обнадеживающей. Я



не в состоянии сказать, можно ли считать эту теорию физически полноценной; это связано с пока еще непреодолимыми математическими трудностями, которые, впрочем, встречаются при применении любой нелинейной теории поля. Кроме того, вообще кажется сомнительным, можно ли из теории поля вывести атомистическую структуру вещества и излучения, а также квантовые явления. Большинство физиков без сомнения ответят убежденным «нет», ибо они полагают, что квантовая проблема должна решаться принципиально иным путем. Как бы то ни было, нам в утешение остаются слова Лессинга: стремление к истине ценнее, чем гарантированное обладание ею».

Такова его самая последняя, данная за месяц до кончины, оценка своих усилий вывести путем обобщения полей тяготения единую теорию поля, которая могла бы образовать основу для всей физики. Эта оценка не стимулирует физиков идти по его пути.

Это и есть та персонифицированная драма идей, о которой Эйнштейн умолчал в книге, только косвенно затронув в ней трудности, все еще не решенные физикой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем краткий итог.

Теория познания Эйнштейна, выработанная им на основе своеобразной трактовки собственного успешного построения теории относительности и обобщенной теории тяготения, не оправдалась. Высоко оценив значение теории как целостности, поднявшись в этом отношении над гносеологией позитивизма, Эйнштейн не сумел полностью извлечь из этой идеи ее глубокий смысл и даже обеднил ее, так как не понял логической и генетической связи теории с опытом. Оказался неверным его основной тезис о том, что нет пути от опыта к построению теории. Этот тезис привел Эйнштейна не только к отрицанию основных идей квантовой физики, но и к созданию искусственной преграды к познанию связей нового типа в природе. Он привел к развитию рационалистической теории познания и к формулировке программы развития физики, которая оказалась нереализуемой.

Подавляющее большинство физиков не пошло за Эйнштейном до конца. Жизнь заставила их искать другую линию развития физики. Но в их глазах Эйнштейн по-прежнему остается великим физиком нашего времени. То, что он сделал для физики в ее критический переломный период, навсегда сохранит свое значение в ее развитии.

Мы не назовем его «беспринципным оппортунистом» в философии. Такого наименования заслуживают те, кто идет на сделку с совестью. Эйнштейн был не таков. Он был убежден в правоте своего пути, но мы не можем не сказать: в теории познания он заблуждался. Выработывая ее, он опирался на слишком узкую базу своего профессионального опыта и слишком односторонне его толковал. Это оказало влияние и на понимание им путей дальнейшего развития физики. Упрек, в свое время адресованный им Маху, может быть возвращен и ему самому: философские предубеждения и ему помешали правильно определить пути познания и перспективы развития физики.

Научный путь Эйнштейна весьма поучителен. Он говорит о необходимости глубокой и профессиональной разработки гносеологических проблем, которые возникают в ходе развития современного естествознания. Как бы ни были сложны эти проблемы, они могут быть разрешены, вопреки пониманию Эйнштейна, с позиции целостной философии, в основе которой лежат признание внешнего мира и правильное истолкование путей его отображения в сознании.

Эта целостная философия — материализм, поднятый до уровня подлинной науки трудами Маркса и Энгельса, а в нашем веке — Ленина. Богатейший опыт развития общества и естествознания учит нас тому, что метод философского материализма адекватен реальному процессу познания. Нам не нужно искать новой гносеологии. Но мы обязаны смелее и глубже проникать в суть проблем, которые ставит современное естествознание, и развивать материалистическую гносеологию дальше, как это и завещали нам наши великие учителя.





# ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абрагам 248, 275  
Аристотель 10
- Барнетт 245  
Беркли 266, 315  
Блэк 35, 44  
Бозе 258  
Больцман 257, 258  
Бор 219, 255, 259, 260, 261, 267, 313  
Борн 234, 251, 254, 257, 259, 261, 264, 267, 278, 288, 299, 301, 313, 316, 317  
Бриджмен 270, 272, 273, 276, 281, 311  
Броун 53
- Вольт 72
- Галилей 9 и д.  
Гальвакс 252  
Гальвани 72  
Гейзенберг 234, 261, 267  
Гейтлер 313  
Гельмгольц 49  
Герц Г. 102, 123, 248, 252  
Гиббс 256  
Гюйгенс 89, 97
- Дебай 254  
де-Бройль 222, 234, 260  
Декарт 292, 293, 319  
Демокрит 48  
Джермер 260  
Джоуль 44  
Дирак 234, 261  
Дэвисон 260
- Зельдович 321  
Зоммерфельд 260, 275
- Инфельд 244, 246, 290, 297, 300, 307  
Иордан 261  
Иоффе 253
- Кант 265, 294  
Карман 254  
Кауфман 275  
Кеплер 283  
Комптон 256, 260  
Коперник 127, 175, 307, 308, 309  
Кулон 64, 71 и д.
- Ланжевэн 248  
Лейбниц 23, 283
- Ленин 326  
Лессинг 325  
Лоренц 248, 272, 278, 299
- Майер 44  
Майкельсон 144  
Максвелл 102, 248, 249, 253, 267, 272, 277, 298  
Маргенау 269  
Мах 257, 264—266, 276, 285, 292, 298, 311, 315  
Минковский 276, 278  
Морли 144
- Новиков 321  
Ньютон 9, 265, 273, 276, 277, 279—283, 286, 288, 289, 301, 308
- Оствальд 257, 264, 266
- Паули 261, 313  
Петров 319, 321  
Планк 213, 251, 252, 253, 256, 257, 258  
Попов 248  
Птоломей 175, 307, 308, 309  
Пуанкаре 248, 278, 299
- Резерфорд 255, 259  
Рейхенбах 281  
Рёмер 78  
Роуланд 75, 104  
Румфорд 39, 44
- Спиноза 292  
Стокс 253  
Столетов 252
- Тамм 323, 324  
Томсон 260
- Фарадей 102, 117—119  
Ферми 261  
Физо 78  
Фитцджеральд 272  
Фок 307  
Франк 270  
Френель 94
- Шредингер 229, 234, 259, 261
- Энгельс 326  
Эрстед 78, 115, 119
- Юнг 94