

Ирина Львовна Радунская

Призраки



Аннотация

Эта книга — о химерах, сродни снам, которые умеют видеть ученые, чтобы представить то, чего нельзя наблюдать. В этих сновидениях окружающий мир более рельефен, чем в реальности. Книга — о машинах, которые никогда не работали, даже не существовали, но выполнили для человечества огромную работу...

ВВЕДЕНИЕ

Эта книга — о химерах, сродни снам, которые умеют видеть ученые, чтобы представить то, чего нельзя наблюдать. В этих сновидениях окружающий мир более рельефен, чем в реальности.

Книга — о машинах, которые никогда не работали, даже не существовали, но выполнили для человечества огромную работу...

Ахиллес гонится за черепахой, кванты «играют» в бильярд, «дьявол Максвелла» соперничает с «богом Ньютона», случай сражается с неизбежностью, механизм Стевина и машина Карно преодолевают «вечный» двигатель, «близнецы Эйнштейна» штурмуют космос...

Вы вправе возразить: дьяволы не существуют, идеальную машину Карно создать невозможно, наконец, у Эйнштейна никогда не было близнецов! А между тем не работавшая машина Карно и несуществующий дьявол способствовали созданию термодинамики — науки, указавшей причину развития всех процессов природы от прошлого к будущему. А неродившиеся близнецы принесли человечеству столько сведений о жизни Вселенной, что еще многие поколения будут питаться их мудростью...

Речь в книге пойдет о мысленных экспериментах и математических моделях. Они способствовали рождению самых плодотворных теорий, помогли возникнуть многим областям знания. Мысленные эксперименты и математические модели позволяют изучить и предсказать свойства и поведение реальных машин еще до того, как они изготовлены, перед тем, как начато их конструирование.

Вы можете спросить: почему такой акцент на мысленных экспериментах? Разве

реальный опыт не высший судья науки? Разве не он главная движущая пружина и в конструировании, и в проверке любой теории и гипотезы?

Чтобы не уподобиться глубокомысленным спорщикам, озабоченным решением проблемы: что первичнее — курица или яйцо, обратимся к истории и к достижениям наших дней. Разберемся, как соотносятся между собой мысленный эксперимент и реальный опыт, наблюдение и теория.

Многие знают рассуждение об Ахиллесе и черепахе. Оно принадлежит греческому философу Зенону. Суть его, изложенная в современном духе, такова. Ахиллес пробегает сто метров за десять секунд. Черепаха проползает за это время только десять метров, но имеет сто метров форы. Вопрос: через какое время Ахиллес догонит черепаху?

Попробуем ответить, следуя Зенону. Пробежав сто метров, Ахиллес обнаружит, что черепаха продвинулась вперед на десять метров. Преодолев эти десять, он увидит, что она впереди на один метр. Он продвинется на метр и заметит, что она все еще впереди на 10 сантиметров. Продвинувшись на 10 сантиметров, он убеждается в том, что она все еще впереди, между ними 1 сантиметр. Еще одно усилие, еще один сантиметр, но между ними расстояние в 1 миллиметр! И так далее, продолжает Зенон. Вывод: Ахиллес никогда не догонит черепаху.

Вот еще одно из логических построений Зенона. Стрела выпущена из лука, она должна лететь к цели. Но перед тем как преодолеть расстояние до цели, она вынуждена пролететь половину этого расстояния, а до того — половину от этой половины, то есть его четверть, а до того — половину четверти и так далее. Прежде чем стрела преодолеет мельчайшую долю пути, она, естественно, должна пролететь ее половину. Какой же вывод делает Зенон? Стрела не сдвинется с места.

Зенон провел еще ряд подобных рассуждений. Их цель — понять суть движения. Каждое из этих рассуждений, по существу, является мысленным экспериментом. Древние мудрецы не знали, как опровергнуть Зенона. Это может показаться странным. Ведь они видели полет стрелы и вряд ли сомневались в том, что даже малый ребенок способен обогнать черепаху. Однако лучшие умы еще недавно оставались бессильными против подобных рассуждений. Все понимали, что в безупречной логике Зенона скрыт какой-то порок. Но какой?

Движенья нет, сказал мудрец брадатый,
Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить.
Хвалили все ответ замысловатый.

Так Александр Сергеевич Пушкин — даже не будучи ученым — проиллюстрировал доказательную мощь опыта. Его превосходство над словесными аргументами. Но тем не менее стихотворение заканчивается такими словами:

Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей (1).

В какой же части стихотворения содержится истина? Пушкин знал, что видимое движение Солнца в течение веков служило неопровержимым доводом в пользу неподвижности Земли. И своим заключением подчеркнул, что очевидность — не обязательно истинность. И самый очевидный опыт или наблюдение, воспринятые не критически, способны привести к ложным заключениям.

Не удивительно, что один из самых трудных вопросов, обсуждавшихся учеными всех времен, — что есть истина?

Дело в том, что вопросы, с которыми встречаются люди, часто кажутся совсем

простыми, и почти каждый считает, что может на них ответить. Но сравните эти ответы. В большинстве случаев они различны, а иногда и противоречат один другому. Во многих случаях не совпадают и ответы крупных ученых-философов и естествоиспытателей. Конечно, это не значит, что вопросы, приводящие к противоречивым ответам, не имеют однозначного толкования. Оно существует. Но путь к верному ответу не прост.

Вот как далеко завела нас мысль о машинах, которые никогда не работали!

Не будем пока углублять и уточнять подобные вопросы или стремиться дать на них окончательные ответы. Каждый должен прийти к ним сам, обдумывая свой личный опыт, стремясь расширить его активной практической работой и чтением книг, сравнивая мнения специалистов, перед которыми возникали аналогичные вопросы. Вот, например, мнение одного из них о соотношении опыта и теории:

«Опыт никогда не скажет теории «да», но говорит в лучшем случае «может быть», большей же частью — просто «нет». Когда опыт согласуется с теорией, для нее это означает «может быть», когда же он противоречит ей, объявляется приговор: «нет» (2).

Цель этой книги — не подсказать готовый ответ, не сформулировать его, а помочь читателю в его собственных увлекательных поисках. Тем же, кто еще в школьные годы не понял вреда подсказок, напомним мнение авторитета, который утверждал: «Если у тебя спрошено будет: что полезнее — солнце или месяц? — ответствуй — месяц. Ибо солнце светит днем, когда и без того светло, а месяц ночью. Но с другой стороны: солнце лучше тем, что и светит и греет; а месяц только светит, и то лишь в лунную ночь».

Авторитет, мнение которого представляется автору весьма ценным, давал и другие указания, например: «Многие вещи нам непонятны не потому, что наши понятия слабы; но потому, что сии вещи не входят в круг наших понятий».

От него исходит и такой совет: «Если на клетке слона прочтешь надпись: «Буйвол», не верь глазам своим».

И наконец: «Глядя на мир, нельзя не удивляться!» (3.)

Введение несколько затянулось. Оно стало отчасти похожим на научную статью: ссылки на авторитеты, цитаты и т. п. А научная статья должна заканчиваться указанием источников.

Ссылки могут показаться излишними, но традиция требует, поэтому в соответствующих местах текста помещены скобки, содержащие номера источников, которыми пользовался автор:

1. А. С. Пушкин. Собрание сочинений.
2. А. Эйнштейн. Полное собрание научных трудов.
3. Сочинения Козьмы Пруtkова.

Итак: «Принимаясь за дело, соберись с духом» (3), ведь машин-призраков не так мало!

АХИЛЛЕС И ЧЕРЕПАХА

МЫСЛЬ — ФЕТИШ

Гомер, воспевший подвиги Ахиллеса и других героев Троянской войны, вряд ли мог предположить, что имя Ахиллеса войдет в науку. Но для эллинов не существовало границ между поэзией и наукой. И то, и другое относилось к духовной сфере. Правда, поэзия, философия и геометрия почитались высшей сферой духа, а механику в Афинах считали низшей наукой. Платон называл ее пошлым ремеслом. Так сложилось духовное кредо эллинов — они выдвигали работу мысли на первый план перед всякой другой. Гиперболизация возможностей умозаключений, пренебрежение практической деятельностью, непонимание необходимости проверки рассуждений опытом привели в конце концов к упадку эллинской культуры. Но вначале способствовали ее расцвету и распространению.

Эллинская культура вышла далеко за пределы Греции, охватив все Средиземноморье, и даже выплеснулась за его границы. На юге Италии издавна существовал город Элея, еще в конце VI века до нашей эры известный своей философской школой. Имя основателя школы не сохранилось. Некоторые связывают ее возникновение с поэтом и философом Ксенофаном, прославившимся философской поэмой «О природе». В ней он осмелел многобожие и склонность греческой религии наделять богов обликом людей. Ксенофан, конечно, не был атеистом. Он, как и его современники, слишком мало знал окружающий мир, чтобы обойтись без мысли о высшем существе, создавшем этот мир и управляющем им. Ксенофан развивал весьма неясные представления об едином, неподвижном, вечном, однородном, имеющем форму шара сущем, которое есть и природа и бог и всем своим существом способно мыслить, видеть, слышать.

Парменид, философ и видный политический деятель Элей, воспринял учение Ксенофана и по традиции изложил свои мысли в поэме, которую тоже назвал «О природе». Он не уделял большого внимания богу, но считал, как и Ксенофан, все сущее единым, неподвижным, неизменным, непрерывным, вечным и имеющим форму шара.

Парменид мог бы избрать в качестве образца для подражания диалектическое учение Гераклита Эфесского и продвинуться ближе к материализму. Ведь уже в то время Гераклит провидел, что мир состоит из атомов и пустоты и что диалектика развития Вселенной скрыта в движении атомов. Но Парменид предпочел бороться с идеями Гераклита. Он противопоставил мышление чувственному восприятию и объявил мышление единственным источником истины. Он отождествил мысль и бытие. Из этого вытекало, что небытие невозможно, ибо небытие немыслимо, а значит, невозможна и пустота. Но без пустоты нет движения, ибо тела не могут двигаться сквозь тела. Значит, нет движения. Так считал Парменид и был уверен, что его рассуждения опровергают учение Гераклита о движении. У него были верные ученики и последователи — иначе его учение не осталось бы в истории. Но были и несогласные с ним.

Чтобы убедить несогласных, ученик Парменида Зенон разработал 45 доказательств в защиту своего учителя и его учения. До нас дошло девять из них. В том числе рассуждение о невозможности движения стрелы, рассуждение о быстроногом Ахиллесе, не способном догнать черепаху, и еще три, посвященных доказательству невозможности всякого движения. Физики признают значение аргументов Зенона Элейского для процесса выработки правильных понятий — ведь вопрос не в том, существует ли движение, ибо это несомненно, а в том, как его выразить в понятиях, как найти связь между абстрактными понятиями и конкретными представ-представлениями предметами. И в конечном счете — между мыслью и реальностью, объективностью и ее субъективным восприятием...

Кроме проблемы движения, в науке о природе немало подобных стержневых проблем: определение понятий теплоты, энергии, материи, времени, пространства и многого другого, что составляет плоть и кровь Вселенной.

Бескрылый символ быстроты

Но вернемся к проблеме движения — на ее примере рассмотрим драматическую напряженность отношений между конкретными предметами и абстрактными понятиями. Существование движения — объективный факт, не требующий логических доказательств. Но процесс движения в течение многих веков оставался слишком сложным для понимания, как мы теперь говорим: он внутренне противоречив. Когда Зенон доказывал неподвижность стрелы, утверждая, что она, занимая определенное место, не может занять другое, а значит, не может двигаться, он, по существу, проводил мысленный эксперимент. Отваживался доказывать — причем оперируя лишь абстрактными рассуждениями — неподвижность предмета, слывшего символом быстроты! Настаивал на этом, настаивал вопреки очевидности, наперекор своему опыту и безусловному опыту оппонентов... И никто не мог опровергнуть его мысленный опыт, разрушить логику рассуждений. Да, логику, хотя логика как наука возникла много позже. Но даже создатель логики Аристотель не сумел опровергнуть доводы Зенона.

Не мог Аристотель объяснить и того, как Ахиллес обгонит черепаху, если он, в соответствии с рассуждениями Зенона, в каждый момент обречен видеть ее впереди себя. Хотя бы немного, но все же впереди.

Вероятно, экзотические мысленные упражнения Зенона не дожили бы до наших дней, если бы в них не таился зародыш, развившийся со временем в мощнейшую отрасль практической математики.

Сделаем еще шаг вперед. Сродни трудностям Ахиллеса в его погоне за черепахой и затруднения, возникающие при попытке объяснить, что такое куча. Каждому ясно, что куча — это множество зерен. Одно зерно — не куча. И два зерна не куча. И три. И десять... Когда же начинается куча? Когда «не куча» переходит в «кучу»? Может быть, когда в ней сто зерен? Попробуйте сказать, что это — уже куча. Сразу следует вопрос: а 99 зерен? И вам придется объяснить, как одно зерно, которое «не куча», добавленное к «не куче», способно превратить все это в кучу... Ни древние, ни средневековые мыслители не знали, как бороться с подобными противоречиями.

Теперь мы понимаем, что трудности в случае Ахиллеса или стрелы несравненно более серьезны, чем затруднения с проблемой кучи. Здесь есть хотя бы за что «зацепиться». Ведь любая куча содержит конечное количество объектов — зерен, кирпичей, монет... И дробить их на более мелкие части, как дробил Зенон длину пробега, уже нельзя. Тут есть предел, который ограничивает задачу, сообщает ей определенность, разумную ограниченность.

В случае с Ахиллесом все много сложнее. Конечный отрезок пути можно, по крайней мере, в принципе разделить на бесконечное число частей, если раз за разом делить его пополам.

Точно так же можно разделить на бесконечное число все более мелких частей любой конечный интервал времени. Но бесконечное число этапов, которые должен преодолеть Ахиллес, чтобы поравняться с черепахой, на самом деле не требует бесконечного времени!

Вот тут-то проявляется принципиальное отличие между мысленным и реальным экспериментом. Мысленный опыт может увести за границы реально возможного, если не ограничить его пределами здравого смысла. А точнее, пределами, определяемыми совокупностью реальных опытов. В мысленном опыте на любом отрезке прямой содержится бесконечно много точек, ибо точки по определению бесконечно малы. Точки, поставленные остро отточенным карандашом, малы, но не бесконечно малы. В реальном эксперименте они конечны. И задача о делении отрезка на такие точки в действительности — задача о куче, а не об Ахиллесе и черепахе.

Трудности, с которыми столкнулись древние философы в задаче об Ахиллесе и черепахе, возникли потому, что, рассуждая о процессе движения, они не знали, что такое скорость, не умели определить, сколько «зерен» пути содержится в одном «зерне» времени. В те времена не существовало понятия скорости. Философы не сформулировали его потому, что конкретная наука (то, что впоследствии развилось в физику) еще не смогла определить такую величину. Теперь любой школьник может решить эту задачу. Он знает, что такое скорость, и умеет составлять и суммировать геометрические прогрессии [1 Он будет рассуждать так.

Двигаясь со скоростью V , Ахиллес преодолеет расстояние A за время $t_1 = A/V$. За это время черепаха со скоростью v проползет путь $a_1 = vt_1 = vA/V$. Чтобы преодолеть его Ахиллесу, понадобится время $t_2 = a_1/v = A/V$. Черепаха при этом проползет путь $a_2 = vt_2 = vA/V$, и Ахиллесу нужно время $t_3 = a_2/v = A/V$. Закон ясен: чтобы догнать черепаху, Ахиллесу нужно бежать время $t = t_1 + t_2 + t_3 + \dots = A/V(1 + v/V + v^2/V^2 + \dots) = A/(V - v)$.

$V - v$

Пример — не доказательство. Но он может послужить толчком для мысли.]

Из этой истории следует важный вывод. Конкретные задачи должны решаться конкретными науками. Более того, успехи конкретных наук служат основой развития философии. Без них философия вырождается в схоластику, в пустые словопрения, в пределе приводящие к проблемам, сходным с вопросом о том, сколько ангелов могут уместиться на

кончике иголки.

В чем же тогда роль и задачи философии?

Сказанного выше совершенно недостаточно для ответа на этот важнейший и сложный вопрос. Но совсем уйти от ответа нельзя. Не следует оставлять возможности для неверного ответа. Поэтому, в предварительном порядке, не полно и не вполне точно скажем: философия — необходимая основа развития конкретных наук. Конечно, задача философии не в разработке и уточнении известного. Здесь конкретные науки должны продвигаться сами. Философия помогает им, указывая путь за пределы известного. То, что иногда называют внутренней логикой науки, — есть продукт философии. Те, кто не понимает этого, уподобляются герою Мольера, не знавшего о том, что он говорит прозой.

Прервем наши рассуждения. Пока мы рассуждали, Ахиллес давно обогнал черепаху, а стрела достигла цели. Ведь за 12 секунд Ахиллес пробегает 120 метров, а черепаха только 12, так что через 12 секунд Ахиллес окажется на 8 метров впереди черепахи, несмотря на то, что вначале она имела 100 метров форы. Мысленный опыт, поставленный иначе, чем это делал Зенон, как и множество реальных опытов, показывает, что Зенон заблуждался.

Но почему поставленный нами мысленный опыт — расчет с помощью формул — дает уверенность в том, что ошибался именно Зенон, ошибался вопреки его мысленному опыту, оставшемуся не опровергнутым в течение веков? И почему мы уверовали в истину Галилея вопреки ежедневному очевидному движению Солнца?

Не будем торопиться с ответом, хотя за нашими плечами опыт многих поколений. Предварительно задумаемся над другими вопросами. Как можно считать опыт высшим критерием истины, если допускать различные оценки результатов опытов, мысленных и реальных? Как нужно ставить мысленные опыты, чтобы они давали истинные результаты? Как толковать реальные опыты, чтобы выводы из них были правильными? Что может служить критерием правильности?

Можно ли доверять многовековому опыту?

Иногда говорят, что критерием истины является не единичный опыт отдельного человека, а многовековой опыт всего человечества. Но ведь видимое движение Солнца в течение веков наблюдало множество людей. Нет, все это не так просто. И многовековой опыт всего человечества может в течение веков служить основой всеобщего заблуждения.

Правда, уже Аристарх Самосский за двадцать два века до наших дней понял: видимое движение Солнца ничего не доказывает. И отважился утверждать, что вращается Земля — и вокруг своей оси, и вокруг Солнца. Ему возражали, приводя мысленный эксперимент: если Земля вращается вокруг Солнца, то звезды должны описывать круги на небесной сфере. Но таких кругов никто не видел, торжествовали противники. Значит, Земля неподвижна! Не сразу поверили и Копернику, и Галилею. Но пришлось поверить. Почему? Ведь многовековой опыт всего человечества продолжается. Каждый может наблюдать движение Солнца!

Здесь, в начале нашего пути, еще рано давать прямой ответ на этот вопрос. Но чтобы подойти к ответу, полезно подумать о том, почему Коперник отказался от общепринятого и очевидного, усомнился в системе Птолемея. А ведь система Птолемея, которую с современной точки зрения следовало бы назвать моделью, действовала исправно. Была она очень сложной, со множеством незримых сфер, связанных между собой незримым механизмом, но позволяла астрономам в течение многих веков не только объяснять, но и предсказывать затмения Солнца и Луны, моменты сближения Луны с планетами и планет между собой.

Что же натолкнуло Коперника на мысль об ошибочности системы Птолемея? Коперник умел наблюдать. Проезжая мимо ночных костров, он видел воочию, как костры перемещались ему навстречу на фоне удаленного леса. И понимал, что это ему только кажется, ведь перемещался-то он... Не это ли заронило зерно сомнения в непогрешимости Птолемея?

Два соображения лежали в основе великого труда Коперника: мысль о том, что

видимое движение может не совпадать с истинным движением, и надежда на то, что отказ от громоздкой системы Птолемея позволит проще понять и объяснить факты, известные астрономам. Коперник тоже, по существу, проводил мысленный эксперимент, пытался построить новую, более простую модель мироздания. Предположим, думал он, Земля обращается вокруг Солнца, одновременно вращаясь вокруг собственной оси. Удастся ли на такой основе рассчитать то, что раньше вычисляли, исходя из системы Птолемея?

Понадобился колоссальный многолетний труд, громоздкие, почти необозримые расчеты, потребовалось огромное мужество: он посягал на авторитет великого Птолемея, более того, на авторитет церкви, для которой Земля была центром мироздания. Ведь Иисус Навин приказал «Остановись!» Солнцу, а не Земле. Значит, движется Солнце, а сомневаться в этом — великий грех!

Лишь на смертном одре Коперник увидел книгу, содержащую плоды его труда. Он победил. Нет незримых сфер. Они не нужны. Если Земля вращается, то строение мира оказывается удивительно простым. Все расчеты соответственно упрощаются. Значит, так оно и есть! Он умер спокойно. И несомненно, исполненный сознания великого значения своего труда.

Однако его труд остался почти незамеченным. Даже церковь не обратила на него внимания — странная гипотеза, упрощающая расчеты. Пусть так. Ведь этот каноник не Иисус Навин. Он не остановил Солнце. Оно продолжает двигаться по небосводу...

Это была молния. Вспышка гения. Гром грянул позже. Гром всегда запаздывает, если молния ударит не рядом. А результаты расчетов Коперника были весьма далеки от жизненных интересов массы простых людей. Какое им дело до сложности астрономических расчетов. Разве, упростив Их, Коперник облегчил жизнь народа? Большинство ничего не знало о том, что революция во взглядах на устройство Вселенной уже началась, революция, плоды которой коснутся их потомков.

Первые раскаты грома слышались после того, как, далеко от родины Коперника, Галилей изготовил зрительную трубу и направил ее в облюбованное поэтами итальянское небо. В одну из ночей он заметил три слабенькие звездочки вблизи планеты Юпитер. И раньше он наблюдал множество звезд, недоступных невооруженному глазу. Все они располагались хаотически, эти же вместе с Юпитером выстроились на идеальной прямой... Взглянув на странные звездочки в одну из последующих ночей, Галилей был потрясен. Они, в отличие от всех других... переместились! Переместились, оставаясь на той же прямой. Следующие ночи были пасмурными. Наконец он увидел их вновь. Они двигались с различными скоростями! А когда он увидел еще и четвертую звезду, то окончательно понял, что это планеты, обращающиеся вокруг Юпитера точно так же, как, в соответствии с гипотезой Коперника, Земля и планеты обращаются вокруг Солнца...

Игры в «свои» истины

Стоит ли гадать, к какому выводу пришел бы другой ученый, доведись ему построить телескоп и раньше, чем Галилей, заглянуть в интимный мир Юпитера? О том, что движущиеся звездочки сродни планетам, догадались бы многие. Но большинство наверняка начало бы придумывать дополнительные хрустальные сферы, чтобы в духе Птолемея объяснить движение новых планет. Ведь большая часть ученых, знакомых с трудом Коперника, не поверила ему. Даже такой крупный ученый, как Фрэнсис Бэкон, резко отрицал выводы Коперника. Он писал: «Система Коперника представляет много серьезных затруднений. Тройное движение Земли есть большое неудобство, а отделение Солнца от планет, с которыми оно имеет так много общего, есть также опрометчивый шаг. И введение стольких неподвижных звезд в природу, и притом тел наиболее светящихся, как Солнце и звезды, и обращения Луны вокруг Земли, и некоторые другие понятия обнаруживают в Копернике человека, который не задумывается внести в природу всевозможные вымыслы, заботясь только о том, чтобы его вычисления вышли верно».

Обратите внимание: последняя часть фразы о человеке, «который не задумывается внести в природу всевозможные вымыслы, заботясь только о том, чтобы его вычисления вы — шли верно», показывает четкое понимание того, что Коперник строил свою модель мироздания, исходя из конкретной цели — упрощения расчетов. Но для Бэкона простота не доказательство истинности. У него свои критерии, основанные на традициях и предрассудках, свои истины.

Иное дело Галилей. К тому моменту за его плечами опыты с падением тел и установление закона инерции, борьба с последователями Аристотеля и робкий отказ от публичной поддержки учения Коперника из-за отсутствия веских аргументов. Вот что Галилей писал Кеплеру в 1597 году, за тринадцать лет до открытия спутников Юпитера: «К мнению Коперника я пришел много лет перед сим и, исходя из него, нашел причины многих естественных явлений, далеко не объяснимых с помощью обычных гипотез. Написал многие соображения и опровержения противных аргументов, которые, впрочем, пустить в свет не решился, уstraшенный судьбою учителя нашего Коперника. У немногих стяжал он бессмертную славу и бесчисленным множеством — ибо таково число глупцов — осмеян и освистан».

Но теперь он готов и он в восторге. Вот его отчет: «7 января 1610 года, в первом часу ночи, наблюдая небесные светила, я, между прочим, направил на Юпитер мою трубу и, благодаря ее совершенству, увидел недалеко от планеты три маленькие блестящие звездочки, которых прежде не замечал вследствие слабого увеличения бывшей у меня в то время трубы. Эти светлые точки были приняты мною за неподвижные звезды, они обратили на себя мое внимание только потому, что все три находились на совершенно прямой линии, параллельно эклиптике... Расположение их относительно Юпитера было следующее: две находились на восточной стороне планеты, третья же на западной... Я тогда не определял точным образом их взаимных расстояний, ибо, как сказано, они сочтены мною за неподвижные звезды. Через восемь дней, ведомый не знаю какою судьбою, я опять направил трубу на Юпитер и увидел, что расположение звездочек значительно изменилось... С величайшим нетерпением ожидал я следующей ночи, чтобы рассеять свои сомнения, но был обманут в своих ожиданиях: небо в эту ночь было со всех сторон покрыто облаками. На десятый день я снова увидел звездочки... Их было четыре... Все располагались на той же прямой. Вследствие всего этого я уже без малейшего колебания решил, что существуют четыре светила, вращающиеся около Юпитера подобно тому, как Венера или Меркурий вращаются вокруг Солнца».

Так началась борьба за учение Коперника, великая битва науки с религией, значение которой не может быть в достаточной степени освещено в этом небольшом рассказе. Здесь следует лишь подчеркнуть еще раз, что наблюдение, даже самое бесспорное, может быть объяснено по-разному.

Недаром ученые шутят — был бы факт, а теория найдется. Весьма горькая, но справедливая шутка. Вот два примера. Обнаружив пятна на Солнце и их видимое движение по его диску, Галилей считает их реальными и доказывающими собственное вращение Солнца. Епископ Шейнер другого мнения. Он объясняет их движением каких-то темных тел, не связанных с Солнцем, ибо Солнце — идеал чистоты — не может иметь пятен...

Для Галилея фазы Венеры во всем подобны фазам Луны и служат еще одним аргументом в пользу системы Коперника. Его противники видят в фазах Венеры лишь повод для изобретения новых гипотез.

Как выбирать верховного судью

Итак, мы снова возвращаемся к вопросу о том, как следует понимать слова «опыт является верховным судьей в науке». Что это за судья, высказывания которого могут толковаться двояко?

Из всего сказанного можно сделать лишь предварительный вывод: ни наблюдения

реальных явлений, ни мысленные эксперименты сами по себе не достаточны для создания системы научных знаний. Наука не может возникнуть из набора отдельных наблюдений. Ведь даже плот получается из бревен лишь при помощи связок. Так что же превращает не науку в науку?

Уточним — речь идет о точных науках. Потому что только в случае точных наук недостаточность опытных знаний является катастрофичной. В других же случаях любые описания и систематизация фактов уже сами по себе представляют научную ценность. Например, ботаника и зоология были настоящими науками еще тогда, когда их содержание ограничивалось описанием и классификацией растений и животных.

Главными задачами ученого всегда считались наблюдение, систематизация и осмысливание наблюдений. Это понимали уже древние философы. Аристотель положил это в основу науки. И преуспел. Преуспел в ботанике и зоологии, в грамматике и логике. Но не в физике. Здесь он оставил в наследство потомкам преимущественно заблуждения. Ибо, умея наблюдать и описывать наблюдаемое, он не научился отделять в увиденном главное от второстепенного, общее от частного. Так возникла его механика, основанная на уверенности в том, что скорость пропорциональна силе, что тяжелые тела падают быстрее, чем легкие.

И все это было возведено в абсолют, канонизировано церковью. И столетиями тяжким грузом сковывало науку. И трудно было усомниться в очевидных фактах: две лошади действительно везут повозку быстрее, чем одна; камень в своем падении обгоняет лист, упавший с дерева...

Первым, кто нашел в себе мужество не только усомниться, но и проверить — не только проверить, но и отстаивать новую истину, — был Галилей. В отличие от Аристотеля он не только наблюдал явления природы, но и ставил специальные опыты, получив таким образом возможность самому задавать вопросы природе. А обнаружив ответ, он не только фиксировал его в ряду других, но и пытался найти связи между ними — скрытый смысл, объединяющий различные ответы.

Так, наблюдая падение тел, Он обнаружил не замеченное до того Аристотелем влияние сопротивления воздуха: вот причина, заставляющая легкие тела падать медленнее, чем тяжелые. Легким телам труднее пробиться сквозь воздух. И Галилей ставит мысленный опыт: как падают тела, если воздуха нет? И получает ответ: все они падают одинаково. Мы еще убедимся, каким мастером мысленных экспериментов был Галилей. Он с большим искусством проводил и реальные опыты. В данном случае реальный опыт оказался ему недоступен. Он не мог поставить опыт в безвоздушном пространстве. Лишь много позже Ньютон проделал такой опыт. Откачав воздух из длинной трубы, он увидел, что пушинка падает в ней так же быстро, как дробинка. Он, конечно, не сомневался в этом. Но какой ученый откажется от соблазна проверить мысленный эксперимент реальным!

Галилея не остановила невозможность поставить опыт в вакууме. Ему, мастеру многих остроумных опытов, простых и наглядных или весьма утонченных, в подобных случаях было достаточно мысленного эксперимента — осознания сути реального опыта, очищенного от второстепенных деталей.

Мысленный эксперимент не есть вымысел. Он возникает в результате глубокого, всестороннего осмысливания совокупности многих наблюдений. Такой эксперимент представляет одну из форм абстрактного мышления. Это высшая способность человеческого разума, приведшая к выработке всех необходимых людям понятий.

Галилей стал преобразователем «не науки» в «науку» не только потому, что он первым начал, в отличие от Аристотеля, систематически ставить опыты и применять метод абстракции при их осмысливании. Он впервые понял неразрывную связь между теорией и Опыт, опытом с большой буквы, совокупностью опытов. Теория должна соответствовать всей совокупности опытов, предсказывать новые факты, проверяться и поддерживаться практической деятельностью человека. В этом основа возрожденной науки.

Каков же результат этого урока истории? Ученые поняли: если учение Аристотеля или другое, казавшееся не менее очевидным, не согласуется с конкретным опытом, нельзя

придумывать гипотезы для совмещения несовместимого. Следует смело пересматривать основы, устраняя все, что приводит к расхождению теории и эксперимента. Иначе возникают бессмысленные логические противоречия, как в случае с Ахиллесом, черепахой и стрелой.

Надо помнить: опыт — высший судья, а теория — его законы. Только имея непротиворечивую теорию, можно правильно понимать опыты. Иначе их, как слова дельфийского оракула, каждый может толковать по-своему.

От опыта к теории, от теории к опыту, к практике — вот бесконечная лестница, по которой ученые поднимаются к познанию все более глубоких тайн природы.

МЕХАНИЗМ СТЕВИНА

Заговор невежд и мошенников

Среди множества машин, которые не работали, особое место занимает цепная машина Стевина. Это, пожалуй, первая из машин, изобретатель которой знал заранее, что она не может работать. Знал — и создал ее с намерением передать свое убеждение другим. К сожалению, он не достиг цели. К этому привел ряд причин.

Он писал просто, точно и ясно, но писал, как и говорил, по-фламандски, на своем родном языке, на языке малого народа. Поэтому его могли понимать только жители части Нидерландов и Бельгии, а здесь число образованных людей было весьма невелико во времена, отстоящие от наших дней приблизительно на 400 лет. Правда, труды Стевина были переведены на латынь, международный язык тогдашней науки, и на французский язык, язык дипломатов и светских салонов, но внимания к себе не привлекли. Между тем мало известный своему времени ученый заслуживал внимания — его след в науке заметен и поныне.

Симон Стевин родился в 1548 году в Брюгге. О жизни его известно мало. Вначале он был чиновником и собирал подати в родном городе. Затем стал инспектором сухопутных и водных сооружений. Страна жила трудно под игом покоривших ее испанцев. Возможно, поэтому молодой Стевин покинул родину и в течение десяти лет путешествовал по Европе. Возвратился он только в 1581 году, когда страна уже освободилась от иноземного господства. В последние годы жизни он занимал кафедру математики в Лейдене.

Посещая столицы мелких княжеств и крупных государств, Стевин во многих из них видел машины — разные, похожие только одним: все они не работали. Они не работали, несмотря на упорные попытки их создателей заставить машины работать безостановочно.

В те времена главными двигателями — средством передвижения и тягловой силой — служили животные. Они тянули повозки и качали воду, дробили руду и мололи зерно. Правда, кое-где применялись ветряные мельницы, которые не только мололи зерно, но и качали воду. Но ветер капризен. То его нет, то он разрушает лопасти. Издревле для тех же целей применялись и водяные колеса. Но реки текут далеко не везде. Как при этом не мечтать о других двигателях, использующих более надежные силы природы! Например, силу тяжести, действующую везде и всегда. Или какие-нибудь иные силы. Нужно лишь присмотреться к природе, найти в ее бесконечном богатстве подходящую силу и применить ее к делу. Заставить работать постоянно, а не так, как работает капризный ветер, работать там, где это нужно и где нет надежных, но ленивых рек или бурных, но трудно укротимых водопадов.

И мечтатели трудились, не щадя сил и времени. Искали. Размышляли. Делали выводы. Строили модели. Так они пришли к заключению, что большая модель крутится лучше и дольше, чем маленькая. И обычно это соответствовало действительности. Поэтому изобретатели строили все более и более крупные и даже огромные машины. Но все эти модели и машины не работали долго, хотя должны были работать. Ведь все рассуждения ясно показывали, что машины хорошо задуманы и должны работать не только долго, но и

вечно. Однако не работали... Хоть убей. И многих изобретателей казнили или сажали в тюрьмы нетерпеливые заказчики, вкладывавшие деньги в опыты и в строительство машин. Дельцы не делали различия между истинными энтузиастами и мошенниками, а среди изобретателей все чаще попадались жулики и обманщики, которых интересовала только нажива, а машина была лишь поводом для того, чтобы выманивать деньги из легковых.

Многое повидал Стевин в своих скитаниях. Повидал, изучил, обдумал. Большинство из таких машин содержало рычаги и блоки, зубчатые и ременные передачи, насосы и водяные колеса, которые так успешно работали во всех случаях, когда их приводили в движение вода, ветер, животное или просто рука человека. Для того чтобы создать машины, действующие без помощи воды, ветра или животных, изобретатели создавали все более сложные комбинации простых механизмов, надеясь так хитро их соединить, чтобы они работали сами по себе, одна от другой. И некоторые из машин действительно слушались. Но недолго. Потом останавливались. Портились? Или расчеты были не точны? И изобретатели их улучшали. И они работали дольше. Но вновь останавливались. Что-то опять портилось. То ли расчеты требовали дальнейшего уточнения. То ли нужно было тщательнее изготовить какую-то деталь. Уменьшить трение. Усложнить конструкцию... Найти более хитроумное приспособление... Ведь стоило потратить новые силы и дополнительные деньги, чтобы заставить в конце концов работать даровые силы природы под стать тому, как задаром работает ветер и текущая вода!

При том уровне знаний требовалась незаурядная интуиция и решимость, чтобы сказать себе — нельзя! Невозможно заставить работать силу тяжести больше чем один раз. Невозможно заставить силу поверхностного натяжения переливать воду из нижнего сосуда в верхний. Невозможно... Да, сила текущей воды может вращать колесо. Но это колесо не сможет вернуть воду обратно, вверх против течения, чтобы, стекая еще раз, она вновь вращала то же колесо.

Пусть умник убирается восвояси!

Стевин понял эту очевидную в наши дни, но загадочную в его время истину. Он только не мог понять тупого упрямства изобретателей и их меценатов, не желавших прислушаться к его словам. Они были единомышленны — пусть скептик убирается восвояси и не мешает работать! Чего стоят его рассуждения, если модель вот-вот начнет действовать! Может быть, этот ученый муж просто добивается того, чтобы мы отступились, а сам доведет нашу идею до конца. И обогатится! Пусть убирается...

И он уходит. И едет дальше. И все повторяется в другом месте. Наконец он возвращается на родину. На освобожденную родину, где уже нет всевластия князьков и инквизиторов. И он думает. И ставит опыты. Опыты, которыми до него никогда не занимались ученые, а только изобретатели двигателей. Ведь учащихся от поколения к поколению убеждали в том, что они должны лишь наблюдать природу и размышлять — так учил великий Аристотель и все другие великие ученые до Аристотеля и после него: Платон и Евклид, и менее великие, но достойные именоваться учеными. Однако он, Стевин, ставивший выше всех Архимеда, тем не менее думал по-своему. Одними рассуждениями, считал он, не добьешься большего, чем сделал Архимед. Природа не легко выдает свои тайны пассивному наблюдателю. Только производя опыты, можно узнать кое-что новое. Конечно, если продумывать результаты. Продумывать критически, не упорствовать, как изобретатели вечных двигателей. Продумывать так, как это делал Архимед, и проверять свои мысли числами, как это делал он. Числами и чертежами.

Шли годы. Через пять лет после возвращения Стевина на родину вышла его книга, написанная, как мы уже знаем, к сожалению, по-фламандски. Замечательная книга. На ее титульном листе автор начертал вещие слова: «Чудо не есть чудо», а под ними изобразил цепь, на которую нанизаны 14 одинаковых шаров. Цепь перекинута через треугольник, лежащий на гипотенузе прямым углом вверх. 4 шара лежат на большом катете, 2 — на

малом. Остальные 8 висят внизу.

Эта машина — символ. Основа всего, что содержится в книге. Это новое слово в науке. Слово, которому было суждено надолго остаться неслышанным. Цепная машина и не должна была работать, но через многие годы она поставила своего создателя рядом с великими учеными.

Книга, о которой идет речь, посвящена статике — древнейшему разделу механики, и включает в себя гидростатику — раздел, имеющий особое значение для Нидерландов, страны мореходов и земледельцев, постоянно отстаивавших свои поля от разрушительных набегов воды. В этой книге Стевин предстает перед нами как прямой последователь Архимеда. При решении задач и общих проблем механики он применяет исключительно геометрический метод. Следует Архимеду и в построении системы определений, постулатов, теорем и в последующем решении задач. Однако он отнюдь не эпигон. При всем сходстве применяемых приемов и внешней аналогии в изложении материала имеется одно отличие. Существенное отличие, делающее Стевина одним из великих и самостоятельных умов, не столько завершающих труды предшественников, сколько открывающих дорогу последователям, пусть даже оставшимся в неведении его заслуг.

Это важное отличие является причиной того, что Стевин попал в нашу книгу. И оно так существенно для понимания эволюции науки, что на этой особенности метода Стевина надо остановиться подробнее.

Могущество интеллектуального обаяния

Архимед, живший за две тысячи лет до Стевина, в ряде трудов построил первую часть механики — статику. Исходя из чисто геометрических соображений, он открыл и геометрически обосновал свойства рычагов и сформулировал то, что мы теперь называем законами рычага.

Люди задолго до Архимеда пользовались рычагами и были знакомы с их основными свойствами. Но никто не мог понять и объяснить, почему рычаг действует так, а не иначе. Обычно для объяснения свойств рычага ссылались на свойства круга, а свойства круга при этом выступали как нечто совершенно мистическое. Архимед откровенно и остроумно высмеивал подобные рассуждения. Насмешливым, лукавым, мудрым предстает перед нами Архимед на картине великого испанского художника Риберы: с тонкой улыбкой Архимед протягивает зрителю чертеж, словно делится с ним недоумением: смотри, какую чушь тут понаписали невежды...

Установив свойства рычагов при помощи геометрии, Архимед показал, что действие многих простых машин, например ворота или блока, может быть понято и объяснено на основе свойств рычага. Более того, Архимед догадался, что при решении многих трудных геометрических задач, столь трудных, что ни он, ни другие не могли справиться с ними при помощи общепринятых тогда методов, можно свести каждую из них к задаче о рычаге или о рычагах.

А это уже не составляло для него большого труда. Так Архимед нашел решения многих сложнейших геометрических задач. Но трагедия его жизни (и не только его, но и многих людей, которые жили после него и могли бы шире пользоваться плодами его гениального ума) состояла в том, что Архимед вынужден был скрывать свой метод. Не из корысти или тщеславия. Из-за боязни преследований и гонений, опасаясь обвинения в отходе от традиций математики того времени.

Несмотря на то что важнейший труд Архимеда, содержащий секрет уникального метода, был утрачен и найден лишь в XX веке, появился незаурядный ум, который поднял его эстафетную палочку. Это был Стевин. За прошедшие между их жизнями века у Архимеда не было более близкого ему по духу и взглядам человека. Стевин, ничего не зная ни о скрытом труде Архимеда, ни о трагедии великого учителя, воспринял его идеологию и сделал следующий шаг. Это был шаг отважного мудреца. Стевин понял, что создать

механизм, работающий вечно, без приложения внешних сил, невозможно, если даже в игру включатся такие вечные природные силы, как сила тяжести. Стевин не посягал на вечное движение — как и любой другой, он видел вечное движение звезд и планет. Стевин отрицал возможность создания вечного двигателя.

Наблюдая, как долго вращается маховик на хорошо смазанной оси, он понял роль трения как помехи движению. Понял, что при отсутствии трения маховик мог бы вращаться вечно. Конечно, не самостоятельно, а если его сначала привести во вращение. Он, по-видимому, первым догадался, как нужно ставить мысленные опыты. Осознал, что мысленный опыт может заменить и даже превзойти реальный опыт. Но это возможно только тогда, когда из него устраняют все второстепенное и оставляют лишь главное.

Так, Стевин первым ввел в науку абстракцию — метод, позволяющий успешно изучать сложные проблемы, решать запутанные задачи, очищая их предварительно от второстепенных деталей, от подробностей, не оказывающих существенного влияния на изучаемый процесс. Стевин ввел метод абстракции не только в механику, но и в гидростатику и в обеих областях совершил первый за многие века прорыв за пределы, достигнутые Архимедом.

Отважное одиночество

Великий древний ученый, вопреки мнению большинства современников, верил в шарообразность Земли. Все его исследования плавания тел и других задач гидростатики основаны на том, что поверхность всякой жидкости, строго говоря, имеет форму шара, центр которого совпадает с центром Земли. Так шарообразность Земли была впервые положена Архимедом в основу научных исследований, в основу расчетов. И каких сложнейших расчетов!

Стевин не побоялся пренебречь учетом шарообразности Земли в своих мысленных экспериментах. Гениальность Стевина, его принадлежность к будущему, а не к прошлому проявились в том, что он понял: учет шарообразности Земли при расчетах практических задач гидростатики излишен, он только придает вычислениям ненужную громоздкость. При решении таких задач можно и нужно рассматривать поверхность воды как плоскую поверхность!

Среди постулатов, приводимых в «Началах гидростатики», Стевин помещает «Постулат VI. Верхняя поверхность воды есть плоскость, параллельная горизонту». И дает «Пояснение. Известно, что поверхность воды имеет форму сферы, соответствующей земной поверхности или ей концентрической, а также, что капли имеют особую форму поверхности. Наш постулат не распространяется на последние ничтожные количества воды; однако это не имеет практического значения. Что же касается сферической формы поверхности воды, соответствующей земной поверхности, то принятие этого положения чрезвычайно затруднило бы доказательство последующих предложений, не дав никаких практических выгод для гидростатики. В целях упрощения рассуждений мы принимаем поэтому, что поверхность воды является плоской и параллельной горизонту».

Яснее не скажешь. Но Стевин остался не услышанным, и метод абстракции был заново разработан Галилеем.

Вернемся к проблемам механики, к тому, как Стевин, с помощью мысленных экспериментов, решает некоторые из них. В качестве основы своих рассуждений о механике Стевин взял цепную машину, о которой говорилось выше. 14 шаров на цепи, висящей на треугольнике. На прямоугольном треугольнике, один катет которого вдвое больше другого. На большом катете лежат 4 шара, на малом только 2. Остальные висят. Если бы 4 шара перевесили в этих условиях 2, то цепь сама по себе пришла бы в движение. Но это невозможно, считает Стевин. Если бы это было возможно, осуществился бы вечный двигатель, вечно черпающий даровую работу от силы тяжести. Ведь при перемещении цепи первоначальное расположение шаров повторяется вновь и вновь. Эти новые положения

ничем не отличаются от первоначальных. Изобретатель вечного двигателя сказал бы (и многие говорили): прекрасно! Все начинается еще раз и будет повторяться вновь и вновь; цепная машина может работать вечно, совершая даровую работу. Стевин сделал противоположный вывод. Сила тяжести не может вечно давать даровую работу, значит, не может и сдвинуть с места цепную машину. А если эту машину толкнуть, ее остановит сила трения.

Цепная машина Стевина это схема, символ всех «вечных» двигателей, задача которых, по мысли их изобретателей, вечно черпать работу из силы тяжести при многократном повторении некоторого цикла движений. Многие известные проекты вечных двигателей содержали варианты цепных машин или колес, несущих подвижные рычаги с грузами. Но в отличие от своих предшественников и от всех последующих творцов вечных двигателей, Стевин сумел заставить свою цепную машину провести огромную работу. Работу, которая значительно приблизила человечество к овладению силами природы. Он применил цепную машину для вывода законов механики.

Теперь, уже без всяких вычислений, исходя лишь из того, что движение цепи не может начаться само по себе, Стевин утверждает: равновесие не нарушится и в том случае, если среди сторон треугольника не будет ни одной горизонтальной. Так же просто получается условие равновесия груза на наклонной плоскости, удерживаемого другим, висющим отвесно. Висящий груз должен быть во столько раз легче груза, лежащего на наклонной плоскости, во сколько высота наклонной плоскости меньше ее длины. Из подобных рассуждений вытекают и условия равновесия трех сил, приложенных к одной точке: они должны быть пропорциональны длинам сторон некоторого прямоугольного треугольника и направлены перпендикулярно этим сторонам. Так, исходя из невозможности создания вечного двигателя, Стевин получил закон равновесия грузов на наклонной плоскости, а затем построил все законы рычага и другие законы статики, прибегнув лишь к простейшим геометрическим построениям.

Стевина сближает с Архимедом и его критика попыток древних и средневековых ученых объяснить свойства рычага свойствами круга. В «Приложении к статике» Стевин поместил специальный раздел, озаглавленный «Причина равновесия рычага ни в какой мере не зависит от дуг круга, которые описывают концы его».

Он пишет: «То, что равные грузы, подвешенные к равным плечам рычага, пребывают в равновесии, достаточно подтверждается нашим непосредственным чувством. Но причина того, что два неравных груза, подвешенных к неравным плечам рычага, пребывают в равновесии, если отношение их весов обратно пропорционально отношению тех плеч, к которым они прикреплены, отнюдь не столь очевидна. Древние полагали, что причина лежит в дугах круга, описываемых концами рычага. Это положение можно видеть в «Механике» Аристотеля и сочинениях его приверженцев. Что это ложно, мы докажем следующим способом: то, что неподвижно, не описывает круга — два груза, находящиеся в равновесии, неподвижны; следовательно, два груза, находящиеся в равновесии, не описывают никакого круга. Итак, никакого круга здесь нет; если же нет круга, то нет и причины, которую ему можно было бы приписать; причина равновесия рычага лежит поэтому не в дугах круга». Далее Стевин указывает, где в основном тексте книги он описывает и доказывает причину равновесия неравноплечного рычага и заключает: «И не приходится вовсе удивляться, что тот, кто принимает подобные ошибочные утверждения за истину, приходит к ряду ложных предположений...»

Чудо не есть Чудо

Вот что ставит имя Стевина в один ряд с величайшими творцами механики — он построил всю статику, исходя из принципа невозможности создания вечного двигателя. Впоследствии этот принцип будет восприниматься как одна из формулировок закона сохранения энергии. Но тогда... Ведь само понятие энергии было осознано лишь более чем

два с половиной века спустя!..

Сейчас мы считаем закон сохранения энергии фундаментом науки. Он настолько прочен, что любое отклонение от него, обнаруженное в каком-либо опыте, трактуется как ошибка. Если же не удастся обнаружить ошибку, то ученые предпочитают немедленно приняться за пересмотр теории, использованной при обработке результатов опыта, сколь точной она ни считалась до того. Классический тому пример-вынужденное предсказание физиком-теоретиком Паули существования неизвестной в его время частицы (нейтрино). Узнав, что опыты с бета-распадом радиоактивных веществ не совпадают с законами сохранения энергии и импульса (куда-то «исчезает» часть энергии), и не сомневаясь в их незыблемости, Паули начал искать причины несоответствия. Не обнаружив ошибок ни в постановке опыта, ни в методах его обработки и расчетах, он предсказал существование новой частицы. Паули наделил ее весьма необычными свойствами, но они позволяли согласовать результаты опыта с законами сохранения энергии и импульса. И все считали его теорию правильной, несмотря на неудачи многочисленных попыток обнаружить предсказанные частицы. Через много лет нейтрино были обнаружены, и это стало новым триумфом науки, новым подтверждением незыблемости законов сохранения энергии и импульса. Но это было все-таки в XX веке. Стевин же, ничего не зная о законе сохранения энергии, всю гидростатику, а вместе с ней и знаменитый закон Архимеда выводит из принципа невозможности вечного двигателя.

Как известно, одной из важнейших работ Архимеда является его трактат «О плавающих телах». В нем он ставит и решает основные задачи гидростатики, столь необходимой при строительстве кораблей. В этой работе содержится закон Архимеда и другие истины, ставшие фундаментом гидростатики. Все эти истины поняты Архимедом интуитивно. Стевин, продолжая традицию, доказывает справедливость закона Архимеда без реального опыта только на основе мысленного эксперимента и убеждения в том, что вечный двигатель невозможен. Для этого он сначала формулирует и доказывает следующую теорему: «Вода удерживает в воде любое положение».

Доказательство: «Если бы было иначе и часть воды А не осталась бы на месте, а опустилась в Д, то вода, которая заняла бы ее место, также опустилась бы по той же причине. Таким образом, вследствие перемещения части А, вода пришла бы в вечное движение, что является абсурдом».

Отметим характерную для Стевина четкость формулировки. Он считает невозможным отнюдь не факт вечного движения, а то, что некая материальная система могла бы самопроизвольно прийти в вечное движение вследствие неких скрытых причин («по той же причине»). Хотелось бы пожелать такой четкости формулировок многим современным авторам. Даже в прекрасных фейнмановских лекциях по физике имеется такая поразительно нечеткая фраза: «Именно недопустимость вечного движения и есть общая формулировка закона сохранения энергии». Правда, непосредственно за этим сказано: «Определяя вечное движение, нужно быть очень осторожным». Но далее тратится треть страницы для того, чтобы пояснить на частном примере, что речь идет, по существу, о циклическом вечном двигателе.

Стевин, по-видимому, сказал бы сразу: невозможность вечного двигателя есть общая формулировка — ему пришлось бы закончить словами — основ механики, ибо понятия энергии он не знал, не знал он и науки об электричестве и теплоте, о многом другом, известном нам. Но он первый, причем с полной ясностью, сформулировал причины невозможности вечного двигателя и положил это в основу современной ему физики.

Стевин бесстрашно начертил свой девиз «чудо не есть чудо» в страшные времена разгула невежества — за тринадцать лет до того, как другого борца за знания, Джордано Бруно, сожгли на костре...

Идеал Карно

История Чайника миссис Уатт

Тяга к легендам, к их сотворению, слепая вера в них лежит, по-видимому, в глубинах человеческой психики. Стимулы, движущие мифотворцами, многообразны. Главная из них — неосознанное стремление к объяснению непонятого. Молния и гром — оружие Зевса. Циклопические сооружения в различных частях света — стартовые площадки инопланетян. Сколь ни фантастическим является объяснение, оно успокаивает: причина обнаружена, все кажется ясным. Возможно, поэтому так популярна сказка о яблоке Ньютона... И так правдоподобна история о пляшущей крышке чайника в кухне миссис Уатт...

Несомненно, у многих возникало желание докопаться до первопричин. Франклин и Рихман с риском для жизни экспериментируют с молниями, и Рихман гибнет, пораженный одной из них. Джордано Бруно отбрасывает благостные сказки о божьем мире, ищет правду и во имя истины не отступает даже перед костром инквизиции.

На фоне этих величественных примеров кажется мелким желание историка приподнять крышку чайника миссис Уатт, чтобы узнать, что воодушевило ее сына. Но, несомненно, тайна психологии изобретателей и первооткрывателей, причудливый, никому до поры до времени непонятный ход их мыслей может составить историю не менее увлекательную, чем миф о Прометее. Тем более, что идеи, принадлежащие отдельному человеку, обычно возникают не на пустом месте. Преемственность подобно цементу скрепляет кирпичи науки, техники, самой цивилизации.

Историю паровой машины иногда прослеживают вплоть до Герона. Свыше двух тысяч лет назад он изготавливал не только игрушки, приводимые в действие паром, но и создал паровую машину, открывавшую двери храма. Эллины действительно обладали знаниями, достаточными для того, чтобы приступить к созданию паровых машин. Но они не пошли по этому пути. Вероятно, потому, что использование труда рабов лишало их стимула совершенствовать технику. Зачем ломать себе голову над усовершенствованием машин, если рабы все сделают и без них? Так и сложилось в этом древнем мире, кажущемся нам за далью времени идиллическим, убеждение, что изготовление и применение машин и орудий — занятие, недостойное свободного человека. А рабы были лишены доступа к знаниям.

Возрождение науки началось с механики. О паре вспомнили не скоро. Ученые тратили слишком много сил на развенчание мифов, пришедших к ним в книгах древних авторов. Одним из таких мифов было учение Аристотеля о том, что природа боится пустоты. Аристотель объяснял этим сцепление тел, действие всасывающего водяного насоса и многое другое.

Всасывающие насосы успешно поднимали воду из рек и колодцев. Но иногда они отказывались работать. Это происходило главным образом на шахтах или в колодцах, глубина которых была очень велика. Никто не знал, почему это происходит, и какова наибольшая глубина, с которой насос может всасывать воду, и когда нужно применять другой вид насосов, нагнетательных, стоящих вблизи уровня воды, а не на поверхности земли.

Только Галилей понял, что всасывающий насос принципиально не способен поднять воду на высоту выше 18 локтей. Следовательно, боязнь пустоты не беспредельна, иначе не возникло бы это ограничение. Странная боязнь, которая исчезает, если столб воды выше 18 локтей! Галилей проводит простой опыт, чтобы измерить силу боязни пустоты. Он берет стеклянную трубку с поршнем, один конец трубки закрыт. В поршне имеется отверстие, через которое трубка заполняется водой. Затем отверстие закрывают, трубку опрокидывают, к поршню подвешивают груз и постепенно увеличивают его. Поршень остается неподвижным, но внезапно он начинает двигаться, и в трубке возникает пустота, когда вес груза достигает веса столба воды, площадь которого равна площади поршня, а высота равна 18 локтям.

Этот опыт разрушил старый миф, но еще не указал ему замены. Природа не знает

страхов, свойственных людям. Просто она что-то может, а чего-то нет. Возможности и силы природы ограничены. Даже металлические стержни ломаются, а цепи рвутся, если нагрузка слишком велика. Среди помощников Галилея был один, очень изобретательный — Торричелли. Галилей пригласил его в Арчетри после того, как учитель Торричелли показал Галилею первую работу своего ученика. Торричелли доказывал, что скорость свободно падающего тела пропорциональна времени падения, он подтверждал законы Галилея о полете брошенных тел и приводил совершенно новые данные об истечении жидкостей из сосудов. Торричелли не долго, по некоторым сведениям — всего три месяца, провел в обществе старого и уже слепого ученого. Он пережил Галилея всего на 5 лет. Эти годы он посвятил главным образом продолжению работ Галилея, направленных против мифа о боязни пустоты.

Для облегчения дальнейших опытов он задумал заменить воду ртутью. Если Галилей прав, то столбик ртути должен разрываться, когда он в 13 раз короче предельно возможного столба воды. Торричелли вычислил эту величину и, подсчитав, что она равна 1,3 локтя, поручил Винченцо Вивиани проверить это. Тот заполнил ртутью стеклянную трубку, запаянную с одного конца, заткнул трубку пальцем и опустил открытый конец в сосуд с ртутью. Когда он убрал палец, столб ртути опустился и остался неподвижным при длине столба 1,3 локтя — Торричелли объявил, что боязнь пустоты, ограниченная определенной величиной, является абсурдом.

Шел 1643 год — боязнь пустоты намного пережила своего изобретателя. Торричелли продолжил опыты и заметил, что высота ртутного столба иногда изменяется. Не желая признать природу капризной кокеткой, изменчивой в своих симпатиях и антипатиях, Торричелли постепенно пришел к убеждению в том, что столбик ртути, как и столб воды, удерживается давлением воздуха, которое, возможно, не всегда постоянно.

Развитие науки в существенной мере зависит от обмена идеями. Даже лучший форвард не может привести мяч к воротам так быстро и надежно, как это сделает сыгранная команда, привыкшая к перепасовкам. Лучшие идеи могут пропасть втуне, застываясь без передачи свежим умам.

В наш век обильной информации обмен идеями способствует книгопечатание — огромное количество научных журналов, разработанная система обзоров и рефератов, многочисленные конференции и симпозиумы. В те времена все это заменялось перепиской. Возникали и центры обмена информацией, роль которых выполняли ученые, склонные больше к обсуждению и критике чужих работ, чем к разработке новых идей. Наиболее известным и активным из них был Марино Мерсенн. В Италии его роль играл друг и ученик Торричелли, Микельанджело Риччи. Он сообщил Мерсенну о работах Торричелли, а тот поведал о них молодому Блезу Паскалю, в то время еще верившему в аристотелевские мифы.

Приоритет кавалера Соломона де Ко

Для Паскаля, прожившего очень короткую жизнь, характерна быстрота мысли. В раннем детстве, когда отец запретил ему занятия геометрией, он создал для себя собственную геометрическую систему. В 16 лет он написал книгу о конических сечениях, став первым после эллинов, сказавшим в этой области новое слово.

Паскаль не только повторил опыты Торричелли, но пошел дальше. Он поместил прибор Торричелли в сосуд и откачал из него воздух. Высота столбика ртути падала по мере работы насоса. Так Паскаль устранил все сомнения в правоте догадки Торричелли.

Не удовлетворившись этим, Паскаль направил своего зятя с прибором Торричелли на соседнюю гору. По мере подъема столбик ртути укорачивался. Сам Паскаль взобрался на колокольню и там тоже зафиксировал опускание ртути. Вскоре Паскаль первым связал колебания уровня ртути с изменениями погоды.

Дальше эстафета перешла к Отто фон Герике, который был на 21 год старше Паскаля и на 6 лет старше Торричелли, но из-за превратностей войны и обширной административной и

дипломатической деятельности обратился к науке лишь в зрелом возрасте. Герике больше всего известен своими опытами с магдебургскими полушариями, наглядно показавшими, сколь велико давление воздуха. Герике изобрел превосходный воздушный насос, потому что до сих пор встречаются в некоторых лабораториях. Даже насосы, применяемые для накачивания шин и мячей, отличаются от насоса Герике только расположением клапанов.

Для характеристики этого бургомистра города Магдебурга следует добавить — он первым обнаружил, что пламя потребляет воздух, и впервые применил для предсказания погоды прибор Торричелли, которому Бойль впоследствии дал наименование — барометр. Бойль усовершенствовал насос Герике, сделав его более удобным, и провел множество наблюдений, установив, в частности, закон, честь открытия которого он разделит с Мариоттом, — закон, показывающий, как изменяется давление газа в сосуде, если изменить его объем. Бойль открыл и то, что вода закипает при более низкой температуре, если откачивать над ней воздух.

Так несколько ученых, следуя за Галилеем, установили основные законы поведения газов и избавили науку от мистической боязни пустоты.

Не известно, от чего отталкивался полузабытый кавалер Соломон де Ко, издавший в 1615 году во Франкфурте книгу на французском языке, в которой он описывал приспособление, позволяющее поднимать воду силой огня. Больше всего это приспособление напоминает машину Герона, открывавшую дверь храма. Может быть, де Ко видел книги Герона, возможно, додумался до этого сам, а скорее всего, он встретил описание приборов Герона у позднейших авторов и воспроизвел один из них. Ведь больше ничем де Ко себя не проявил.

Его прибор предельно прост. Через крышку металлического Так впервые в новое время возродился интерес к силе пара и к возможности ее применения.

Прошло около полувека, прежде чем дело двинулось дальше. Не известно, видел ли книгу де Ко некий маркиз Уорчестер, или он тоже опирался непосредственно на труды Герона, когда строил свою водоподъемную машину. Это уже была действительно машина. Она имела отдельный паровой котел и два резервуара, соединенных с котлом трубами, снабженными кранами. Их открывали поочередно, и пар вытеснял воду из одного резервуара в водоподъемную трубу. В это же время второй резервуар заполняли водой. Вода поднималась на 40 футов. Машина работала в течение 4 лет, начиная с 1663 года, когда на нее была выдана привилегия (патент), и до смерти изобретателя. Потом интерес к ней угас, и она была выброшена на свалку.

В 1698 году Томас Сэвери получил патент на машину, отличающуюся от машины Уорчестера тем, что каждый из резервуаров был снабжен клапаном. Сэвери демонстрировал модель машины Королевскому обществу.

В 1705 году был выдан патент на первую водоподъемную машину, снабженную цилиндром с поршнем, перемещавшимся в нем. Она стала предтечей универсальных паровых машин. Ее построил кузнец и железоторговец Томас Ньюкомен в компании со стеклоделом Джоном Каули. Машина имела металлический цилиндр с поршнем. Пар получался в отдельном котле. Когда пар из котла поступал в цилиндр, поршень поднимался давлением пара. Затем пароподводящую трубу перекрывали краном, а цилиндр обливали холодной водой. Атмосферное давление с силой опускало поршень. Поршень посредством коромысла приводил в действие водяной насос. Так, в машине, имевшей паровой котел, работу выполнял не пар, а воздух.

Ньюкомен и Каули не могли получить патента на свою машину из-за патента Сэвери. Поэтому они приняли Сэвери в компанию и получили патент на троих.

Первую действующую машину Ньюкомен изготовил только в 1711 году по заказу некоего Бэка для подъема воды из шахты. При этом он заменил обливание цилиндра водой впрыскиванием воды. Это значительно ускорило конденсацию пара, а потому и рабочий ход машины.

Здесь в сухие документы вплетается легенда о мальчике Гемфри Поттере,

приставленном к машине, чтобы открывать и закрывать краны, подающие в цилиндр то пар, то воду.

Лень — двигатель прогресса

Мальчику надоело это скучное занятие, и он связал краны с коромыслом посредством бечевки. Машина теперь могла работать без его помощи. Побольше бы нам таких лентяев. Неизвестно, имела ли легенда реальную основу, но Ньюкомен ввел в машину вспомогательную штангу, управлявшую клапанами. Машина стала автоматической. Машины Ньюкомена распространялись медленно. Их применяли исключительно для подъема воды, главным образом в шахтах.

В 1763 году унтершихтмейстер Колывано-Воскресенских заводов Иван Ползунов начал работать над созданием огне-действующей машины для привода воздухоудовок железоделательных печей. В отличие от машины Ньюкомена новая машина имела два цилиндра, поршни которых были связаны между собой. Поэтому она действовала непрерывно и быстро, не теряя, как машина Ньюкомена, большую часть времени на медленный подъем поршня подаваемым под него паром. Она имела автоматическое паро- и водораспределение, большинство ее деталей было изготовлено из металла, а не из дерева, как это делали раньше. К сожалению, тяжелый труд подорвал здоровье изобретателя. Он скончался от чахотки. У него не осталось продолжателей. Его машина проработала совсем недолго. Ни машина Ньюкомена, ни машина Ползунова не являются паровыми машинами в полном смысле этого слова. Они, по существу, предки паровых машин. Они действовали при помощи пара, но работу в них совершал не пар, а давление воздуха.

В чем же заключалась роль пара в машине Ползунова? Пар заполнял пространство под поднимающимся поршнем, а когда в конце хода поршня туда впрыскивалось немного воды, пар конденсировался, под поршнем возникало разрежение, и давление воздуха с силой опускало поршень. Сколь велика эта сила, показал еще Герике — 24 лошади не могли разорвать его полушария.

Так, обогнав паровую машину, забытую сразу же после смерти Уорчестера, вырвалась вперед и дошла до практического применения паро-воздушная машина, в которой реализовались исследования Торричелли, Паскаля и Бойля, впечатляющие опыты Герике.

Создателем современной паровой машины стал Джеймс Уатт, основная деятельность которого развернулась после безвременной смерти Ползунова. Успех, сопутствовавший Уатту, объясняется не только его личными достоинствами, но и тем, что его работы совпали по времени с промышленной революцией, начавшейся в Англии во второй половине XVIII века.

Промышленную революцию иногда отождествляют с изобретением и применением паровой машины. Но Карл Маркс отметил, что главное в этой революции — не изобретение источника энергии, а изобретение ряда исполнительных машин, резко увеличивших производительность труда рабочего. Эти машины — прядильные и ткацкие, а затем и металлообрабатывающие — могли работать и с водяными двигателями. Роль паровой машины состояла в том, что она оторвала промышленность от рек, дала возможность создавать предприятия всюду, где имелись рабочие руки.

Уатт работал не только в благоприятное время, но в удачном окружении. Юношей он отправился из родной Шотландии в Лондон, чтобы обучиться инструментальному мастерству. По слабости здоровья ему пришлось вернуться на родину и начать работать в Глазго. Здесь, в университете, он выполнял обязанности механика и лаборанта.

Если читателю доведется побывать в городе Глазго и он посетит величественный, благородной архитектуры университет, пусть задержится у въездных ворот. Они стоят внимания. Издали железное кружево их фактуры кажется абстрактно-ажурным. Вблизи различаешь: металлическая вязь — имена людей, прославивших Глазго. Среди других — имя механика и лаборанта Уатта.

Уатт изучил три языка и много читал. Известно, что он прочел книгу Деагюлье и Белизара о паровых машинах. Принимал участие в знаменитых опытах Кэвендиша и Пристли по анализу воды, измерял для Блэка теплоту испарения водяного пара (что позволило Блэку создать учение о скрытой теплоте). Сам Уатт составил таблицу упругости водяного пара. Когда в 1764 году Уатту принесли для ремонта модель машины Ньюкомена, он уже был отлично подготовлен к этой задаче. Уатт устранил недостатки модели, и она заработала. Все это было несомненно более реальным фундаментом для создания паровой машины, чем материнский чайник.

Сопоставив принцип работы машины Ньюкомена со своими исследованиями испарения воды и свойств водяного пара, Уатт сразу обнаружил основной порок машины — бесполезную потерю тепла пара. Энергия топлива тратится на испарение воды, а пар, по существу, не работает. Нужно отказаться от использования атмосферного давления и от конденсации пара в цилиндре. Машина должна работать на основе рекомендаций науки.

Пусть цилиндр постоянно остается горячим и в цилиндре работает расширяющийся пар. Конденсация пара должна происходить вне цилиндра. Это вспомогательный процесс, не создающий работы. Ведь в машине Ньюкомена работу создает не конденсирующийся пар, а внешний воздух.

Если в этом деле и играло роль некое озарение, то оно было подготовлено предыдущими длительными исследованиями свойств водяного пара и процесса испарения воды, а также подкреплено пятью годами упорного труда. Патент на паровую машину Уатт взял в 1769 году. В нем содержалось почти все от машины Ньюкомена: цель — откачка воды; конструкция — вертикальный цилиндр с поршнем и балансиrom; прерывистое действие — рабочий ход и холостой ход. Но цилиндр был снабжен теплоизоляцией, прилегание поршня к цилиндру обеспечивалось паклей с салом (отсюда пошли сальники). И главное — принцип действия был совсем иным: рабочий ход осуществлялся за счет расширения горячего пара, который при этом охлаждался. Во время холостого хода отработавший пар выталкивался из цилиндра и конденсировался вне его.

Два десятилетия Уатт совершенствовал свою машину. Он избавился от холостого хода, закрыв цилиндр второй крышкой, снабженной сальником, через который проходит поршневой шток. Теперь он мог поочередно подавать пар по обе стороны поршня. Уатт стремился сделать машину наиболее экономичной, дающей максимум работы при расходе данного количества топлива. Он понял, что выпускать на ветер отработавший пар невыгодно. С ним уходит и большое количество тепла. Для того чтобы извлечь пользу из этого тепла, Уатт снабдил цилиндр паровой рубашкой, окружив стенки рабочего цилиндра оболочкой и пропуская между ними отработавший пар. Для уменьшения потерь тепла он применил еще одну — теплозащитную оболочку. Но в результате пар уходил наружу очень горячим. Для того чтобы использовать и это остаточное тепло, Уатт изобрел конденсатор — сосуд, в котором пар конденсировался, соприкасаясь с холодной водой, подобно тому, как это происходило в цилиндре машины Ньюкомена. Но цель была иной. Не создавать разрежение, а получать теплую воду перед тем, как подавать ее в котел, и тем сэкономить топливо. Для управления подачей пара Уатт изобрел золотник, заменивший систему кранов. Он перемещался поршнем машины при помощи специальных тяг. Наконец, Уатт ввел в машину центробежный регулятор, перемещавший заслонку в паропроводе. Это было нужно, чтобы скорость машины оставалась постоянной, несмотря на изменения нагрузки и давления пара в котле.

Постепенно паровая машина стала первым промышленным автоматом, способным работать без постоянного вмешательства человека. Именно это, а также вдвое более экономный расход топлива (благодаря работе пара в горячем цилиндре и применению конденсатора) обеспечило быстрое распространение паровых машин.

Оценивая заслуги Уатта, Маркс писал: «Великий гений Уатта обнаруживается в том, что патент, взятый в апреле 1784 года, давая описание паровой машины, изображает ее не как изобретение лишь для особых целей, но как универсальный двигатель крупной

промышленности».

Паровые машины не только способствовали превращению мануфактур в настоящие промышленные предприятия, но привели к изобретению пароходов и паровозов. Все это и составило основу промышленной революции. Человечество вступило в новую эру.

В техническом отношении революция ознаменовалась стремительным увеличением производства разнообразных станков, количества и мощности паровых машин. Однако, несмотря на то, что эти машины были существенно экономичнее машин Ньюкомена, они сжигали огромные количества топлива — дров и каменного угля. Катастрофическое исчезновение лесов беспокоило передовых людей начала XIX века не меньше, чем призрак экологической катастрофы тревожит наших современников.

Развлечения молодого инженера

Может быть, настойчивее других об этом думал Никола Леонар Сади Карно, молодой военный инженер, окончивший Политехническую школу в Париже и тяготившийся рутинной бесперспективной армейской службы. Он хорошо знал, что многочисленные попытки сделать паровую машину более экономичной приводили к мизерным результатам. Конечно, устранение утечек пара и уменьшение трения, достигаемые путем все более точного изготовления деталей машины, давало экономию, но она была совершенно недостаточной.

Казалось, над машиной тяготеет какое-то заклятие. Карно интуитивно чувствовал, в чем дело. После Уатта никто, по существу, не углубил понимания принципов работы паровой машины. К сведениям о свойствах пара и процесса испарения воды не прибавилось почти ничего, хотя после исследований Уатта прошло более полувека. Совершенствуя машину, инженеры исходили из чисто интуитивных соображений, действуя методом проб, не направляемых единой руководящей идеей. Никто не знал, возможно ли вообще радикальное улучшение машины, или ее экономичность достигла предела.

Размышления Карно постоянно возвращались к, казалось бы, очевидной особенности паровой машины; на которую совершенно не обращали внимания авторы, пишущие о ней, и инженеры, занятые ее усовершенствованием. Источником работы, получаемой паровой машиной, является топливо, сгорающее под ее котлом. Сгорание топлива и испарение воды в котле должны происходить непрерывно, пока работает машина. Результатом работы машины является непрерывное вращение ее маховика, от которого приводятся в движение различные станки и другие устройства. Это было совершенно очевидно. Но то, что находится между паровым котлом и маховиком — поршень внутри цилиндра кривошипно-кривошипно-шатунный механизм вне его — совершает сложное движение.

Нужно рассмотреть все это в совокупности, не пропуская ни одной мелочи!

Инженеры привыкли к этой сложной кинематике и не видели ничего особенного в том, что поршень совершает возвратно-поступательное движение, повторяя его раз за разом. Карно подумал: не в этом ли повторяющемся движении причина неэффективности паровой машины? Он снова и снова мысленно следит за работой машины: вот открывается золотник, и пар из котла устремляется в цилиндр и, поднимая поршень, совершает работу. Затем золотник переключается, и пар устремляется из цилиндра в конденсатор. Он бесполезно уносит с собой запас тепла, да и маховик затрачивает часть работы на опускание поршня и выталкивание пара. Впрочем, здесь пропущена одна подробность. Еще Уатт понял, что золотник должен работать несколько сложнее. Он заставил золотник прекращать подачу пара в цилиндр до того, как поршень прошел весь рабочий путь. Это называется отсечкой пара. Остаток пути поршень проходит и совершает работу под действием расширяющегося пара. Новые порции пара уже не поступают в цилиндр, но сжатый пар, попавший из котла в цилиндр в первой части цикла, расширяется, толкая поршень. При этом работа совершается за счет давления пара и запасенного в нем тепла и, одновременно, уменьшаются его давление и температура. Уатт увидел в этом способ повышения эффективности машины. Часть работы получается без расхода пара из котла, а в конденсатор выбрасывается более холодный пар.

Не здесь ли скрыта возможность улучшения машины? Как определить оптимальный режим ее работы, в какой момент золотник должен осуществлять отсечку пара? Ведь это определено чисто эмпирически! Каждый делает это по-своему.

Обдумывая все это, Карно учитывал, что при сжатии газы нагреваются, а при расширении охлаждаются.

Знал Карно и о скрытой теплоте, приводящей к тому, что температура воды при кипении не изменяется, хотя к ней и подводится тепло, в то время как для конденсации пара нужно отводить выделяющееся при этом тепло.

Сопоставив все, что ему было известно, Карно понял, что для решения загадки паровой машины следует сосредоточить внимание на ее цилиндре, в котором пар совершает работу, перемещая поршень. Нужно отвлечься на время от котла с топкой и конденсатора, от маховика и шатунно-кривошипного механизма, от золотника и тяг, от центробежного регулятора и от всех других деталей машины.

Достаточно мысленно рассмотреть цилиндр с поршнем, шаг за шагом представить себе, как поршень циклически поднимается силой пара, совершает работу и опускается под действием внешней силы, которая при этом работает против сжимаемого пара. Вместо источника горячего пара — котла и приемника холодного пара — конденсатора следует вообразить некоторые условные нагреватель и холодильник...

Подвиг мысли

Карно не вычислял. Он рассуждал. Он спросил себя, можно ли создать идеальную циклическую машину, которая будет работать эффективнее реальных, забирая при этом от нагревателя и передавая конденсатору столько же тепла, но совершая больше работы? Если да, если более эффективная тепловая машина может существовать, хотя бы в принципе, как некая идеальная машина, то можно мысленно соединить ее с реальной машиной, и тогда произойдет чудо: идеальная машина, затратив только часть даваемой ею работы, равную работе, производимой реальной машиной, заставит реальную машину совершить свой цикл в обратном направлении, отбирая тепло от холодильника и возвращая его нагревателю.

Как только спаренные таким образом машины завершат вой циклы (идеальная в прямом направлении, а реальная — в обратном), поршни обеих машин, нагреватель и холодильник окажутся в исходном состоянии, а в распоряжении экспериментатора останется избыток работы, произведенной идеальной машиной. Ведь, по предположению, она способна получить из данного количества тепла больше работы, чем реальная, а совершив цикл, она через реальную машину вернет из холодильника в нагреватель полученное ею тепло, затратив на это только часть произведенной ею работы. Остальную часть, полученную без затраты тепла — даровую работу, можно было бы применить для других нужд!

Карно понял, что рассмотренная им комбинация из двух циклических машин, работающих от общего нагревателя и с общим холодильником, не может давать избытка работы, иначе эта комбинация была бы вечным двигателем, создающим работу «из ничего», без затраты тепла. Карно, как и Стевин, считал вечный двигатель невозможным и поэтому заключил, что любые машины, свободные от трения и потерь тепла, работающие от общего нагревателя с общим холодильником, должны быть равноценны по эффективности.

Заметим: если Стевин самостоятельно пришел к признанию невозможности вечного двигателя, то Карно уже мог опираться на мнение предшественников, в частности, на книгу «Опыт о машинах вообще». Автором этой книги был его отец, Лазар Карно, крупный ученый и популярный деятель французской революции. Лазар Карно уверенно пишет о том, что всякая машина остановится под действием трения, если она не связана с каким-либо двигателем.

Но это еще не все. Главный вывод Карно-младшего, полученный им из мысленного эксперимента со спаренными циклическими машинами, состоял в том, что циклическая машина превращает тепло в работу потому, что работа, выделяемая при расширении

горячего пара больше, чем работа, затрачиваемая на его сжатие при более низкой температуре. Значит, циклическая машина становится неработоспособной, если температура холодильника и температура нагревателя одинаковы. Работа совершается только при переходе тепла от горячего тела к холодному.

Впоследствии Клаузиус возвел этот принцип, установленный Карно, в ранг Второго начала или Второго закона термодинамики. Второго потому, что после смерти Карно другие ученые установили Первое начало термодинамики — закон сохранения энергии, существование которого Карно считал само собой разумеющимся в форме постулата о невозможности создания вечного двигателя.

Установив свой принцип, Карно ответил и на вопрос, поставленный им в начале исследования об эффективности паровой машины: что нужно сделать, чтобы машина стала более экономичной?

Ответ таков: паровая машина, как всякая циклическая тепловая машина, не работает, если температуры нагревателя и холодильника одинаковы, но работает тем более эффективно, чем больше разность температур между ними. Поэтому для увеличения эффективности паровой машины необходимо повышать температуру пара в котле и понижать температуру, при которой пар заканчивает рабочий ход поршня.

Так был найден принципиальный путь совершенствования тепловых машин.

Следует подчеркнуть особенность мысленного эксперимента Карно — он был осуществлен в области, в которой до него все решалось только руками. Это была область чистой эмпирики — метод проб и ошибок. Все удачные усовершенствования связаны с заменой узлов или вводом дополнительных деталей. Карно первым сделал эту область техники объектом мысленного эксперимента. Он сумел до-биться принципиально важного результата и возвел проблему паровой машины на уровень важнейшей науки о теплоте впоследствии развившейся в термодинамику. Мысленный опыт послужил мостом между техникой и наукой.

Идеи Карно в эстафете XX века

Инженеры, вооруженные указаниями Карно, принялись создавать новые котлы с улучшенными топками и все более совершенными условиями теплообмена между пламенем и водяным паром. Температура пара в новых котлах стала выше. Соответственно увеличилось и давление пара, что потребовало применения более прочных материалов для изготовления котлов, трубопроводов и паровых цилиндров.

Следующим этапом был переход к паровым турбинам, вращающиеся лопасти которых заменили цилиндр с поршнем, сделав ненужным золотник и шатунно-кривошипный механизм. Но это особая история.

Для нас существенно, что, следуя Карно, инженеры подняли температуру пара до сотен градусов, а его давление до сотен атмосфер, значительно улучшив коэффициент полезного действия паровых машин. Важным шагом стал переход к двигателям внутреннего сгорания, в которых температура газов над поршнем превосходит тысячу градусов. Затем появились газовые турбины, в начале названные турбинами внутреннего сгорания. Это привело к дальнейшему возрастанию КПД. Предел при этом определяется тепловой стойкостью турбинных лопаток, омываемых раскаленными газами.

В новейших магнетогидродинамических генераторах энергия еще более горячей газовой струи непосредственно преобразуется в электрическую энергию без участия каких-либо движущихся механизмов. Но законы термодинамики и здесь определяют эффективность процесса, так же как эффективность непосредственного преобразования энергии солнечного света в электроэнергию при помощи полупроводниковых солнечных батарей и всех прочих устройств и процессов, предназначенных для преобразования тепловой энергии в другие ее формы.

Клаузиус еще в прошлом веке смог получить очень простую формулу для вычисления

предельной эффективности тепловой машины, по современной терминологии — предельного коэффициента полезного действия. Он равен отношению разности температур нагревателя и холодильника (конденсатора) к температуре нагревателя. При этом, конечно, температуру нужно измерять от абсолютного нуля (по шкале Кельвина).

Все это еще оставалось неизвестным при жизни Карно. Но принцип, установленный Карно на основе рассмотрения работы идеальной циклической тепловой машины, уже при его жизни Начал работать на будущее. Карно исследовал идеал, несуществующую машину, потому что при своем рассмотрении отвлекался от всех потерь, от трения, от утечек пара и тепла, а также считал, что машина действовала обратимо, то есть ее можно было заставить описывать цикл в обратном направлении, превращая работу внешнего двигателя в тепло. Такой машины не может быть, но, рассматривая ее работу, Карно пришел к пониманию принципа превращения тепла в механическую работу. Этот принцип оказался универсальным. Ему подчиняются превращения тепловой энергии в любые другие виды энергии. Он остается справедливым и при работе холодильных машин, способных охлаждать нагретые тела ниже окружающей температуры, расходуя механическую работу, электрическую или другие формы энергии. Существенно, что принцип Карно, как и вся термодинамика, справедлив не только для циклических, но для любых тепловых процессов.

Идеальная циклическая машина выполнила свою работу. И она навсегда останется в истории науки. Пусть читателей, знакомых с идеальной машиной Карно по другим книгам не смущает новое упоминание о ней. Еще не раз в этой книге мы вернемся к уже знакомым нам предметам, чтобы взглянуть на них под новым углом зрения, в новом освещении.

Истины, добытые наукой, подобны бриллиантам — при благоприятных условиях они способны засиять новыми гранями. И ученые постоянно возвращаются к твердо установленным фактам, чтобы опереться на них и шагнуть дальше и выше.

ДЬЯВОЛ МАКСВЕЛЛА

Верования вместо знаний

В этой книге мы поставили себе целью проследить, как складывалась современная система научного мышления. Ведь только способность к познанию помогла человеку подняться из пропасти невежества на уровень сегодняшней цивилизации. Читатель может возразить — стремление к познанию не есть привилегия человека. Это стремление мы унаследовали от животных. Да, высшие животные способны упорядочивать свои впечатления о внешнем мире и, по мере накопления опыта, видоизменять свое поведение, первоначально основанное на инстинктах и безусловных рефлексах. Условный рефлекс — первая стадия познания. Человек прошел длинный путь через постепенное удлинение и усложнение цепочек условных рефлексов к мышлению. Членораздельная речь и труд, несомненно, сыграли решающую роль в этом процессе. Знакомясь с внешним миром и соизмеряя с ним свои возможности, осмысливая окружающее и самого себя, человек благодаря речи мог передавать свое знание потомкам, делиться им с окружающими. Именно поэтому человечество сумело так быстро, относительно быстро, обогнать в своем развитии животных, занять особое место в подлунном мире.

Не будучи в состоянии понять причины явлений природы, особенности поведения животных, а зачастую и мотивы поступков других людей, даже близких, человек относил все это за счет действия высших сил. Так возникли многочисленные духи и боги, добрые и злые. Обычно это были похожие на людей существа. В этом проявлялся конкретный характер мышления людей, еще не научившихся мыслить абстрактно. Об этом свидетельствуют многочисленные источники, начиная от наскальных изображений, разбросанных в различных местах Европы и Азии, Африки и Америки.

Начальные этапы развития всех человеческих племен протекали, по-видимому,

сходными путями. Но скорости продвижения были различными. Здесь сказались, прежде всего, условия жизни, трудности в добывании пищи, темп увеличения численности племени. Для малых племен неблагоприятные условия, ведущие к смерти отдельных людей, зачастую переходили границу, за которой начиналась гибель всего племени с утратой знаний, приобретенных многими поколениями. Малые племена или племена, территориально раздробленные и лишенные обмена опытом, отставали в своем развитии от тех, где каждое достижение отдельного индивидуума быстро становилось достоянием многих.

Общение положило начало организации, общественной организации, усилившей возможности племени охотиться на крупных животных, бороться с соседними племенами за уголья, пригодные для сбора съедобных растений и охоты. Открытия — освоение огня, создание различных орудий, приручение животных, освоение земледелия, общественное разделение труда — происходили независимо во многих местах земного шара. Но племена, внутри которых эти знания и умения распространялись быстро, охватывая большие массы людей, развивались значительно быстрее, чем изолированные группы, в которых гораздо большую роль играла случайность. Свидетельства тому — возникновение древних цивилизаций Среднего Востока и Восточного Средиземноморья, а также Индии и Китая в тех местах, где плотность населения стала относительно большой, и оставшаяся примитивной культура аборигенов Австралии и Океании, жителей Северной Америки, Сибири и большей части Африки, где малые племена оказались разбросанными и разобщенными в просторах океана, джунглей, тайги или тундры.

Во всех древних цивилизациях и примитивных культурах недостаток знаний дополнялся верой в неведомые высшие силы. Так возникли религиозные верования, от тормозящего влияния которых не освободились и многие наши современники, даже имеющие университетские дипломы. Конечно, тут значительную роль играет воспитание, активность и организованность служителей культа, использующих бессистемность просветительского воздействия, главным образом, на подрастающее поколение. Так уж сложилось, что просвещению уделяется значительно меньше внимания и времени, чем обучению.

Первый из известных нам греческих философов Фалес из города Милеты обладал достаточными познаниями для того, чтобы предсказать затмение Солнца. Он не был мистиком. Однако, как свидетельствует Аристотель, хотя Фалес был знаком со свойствами магнита, для их объяснения он приписывал магниту душу. Фалес и его ученики видели мир, возникшим из первичного вещества в результате его превращений. При этом Фалес считал началом всех вещей воду, из которой все происходит и к которой все возвращается.

Человеку свойственно сомневаться. Ученик Фалеса Анаксимандр не мог понять, как и почему все происходит из воды, и счел первичное вещество качественно неопределенным. Не заменил ли он непонятное еще более непонятным? Его преемник Анаксимен вернулся к мысли об определенности первичного вещества, приняв за него воздух. Таким образом, все они придерживались в той или иной, хотя и примитивной, форме идеи материальности развивающегося мира, признавая при этом зависимость мира и людей от воли многочисленных богов.

Однако Пифагор, тоже принадлежавший к ученикам Фалеса, не удовлетворился подобными воззрениями и развил собственное мистическое учение, в основе которого лежали числа, управляющие миром: в центре мира находится огонь, а вокруг него на гармонических расстояниях вращаются Земля и противоземля, Луна, Солнце и пять планет — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Вокруг — сфера неподвижных звезд. Обитаемая сторона Земли обращена в противоположную сторону от центрального огня, поэтому огонь и противоземля никогда не видны. Противоземля была придумана им для того, чтобы число небесных тел, включая центральный огонь, равнялось десяти, одному из мистических чисел его системы. Наряду с этой мистикой Пифагор пришел к пониманию многих соотношений в области геометрии, арифметики и акустики, отражающих реальные явления природы.

Пифагор заменил многочисленных богов, их волю и капризы гармонией чисел, их закономерными сочетаниями. Он считал: задача человека — понять закономерности чисел и из них выявить связь вещей.

Высшего развития идей Фалеса достиг Гераклит, который, в отличие от ближайших учеников Фалеса, первым уяснил важность движения как результата действия противоборствующих сил. Он писал: «Противоборствующее соединяет, и из несогласия создается прекраснейшая гармония, и все бывает благодаря распре». И еще: «Мир, единый из всего, не создан никем из богов и никем из людей, а был, есть и будет вечно живым, закономерно воспламеняющимся и закономерно угасающим».

Но особенности жизни эллинов принуждали их обращать внимание не столько на явления природы, сколько на взаимоотношения между людьми. С силами природы и трудностями ремесла должны были бороться рабы. Свободные граждане думали о себе и себе подобных. Они хотели спокойствия, порядка и наслаждений. Для достижения этой цели они создавали законы, которые позволяли людям жить, не полагаясь полностью на волю богов. А чтобы законы не противоречили один другому, нужна была логика, формальная логика.

Формальная логика полезна в юриспруденции, но в применении к познанию природы она приводит к парадоксам. В наиболее отчетливой форме это проявилось в апориях Зенона — он не нашел выхода из обнаруженных противоречий. Для этого потребовались века и упорная работа многих мыслителей, таких, как Гегель, Фейербах, Маркс, Энгельс.

Порядок вместо хаоса

Поразительно, что одну из главных истин природы — атомную структуру материи — почувствовали уже древние мыслители. Конечно, это не был атомизм в современном толковании, но первоначальные элементы, составляющие основу учения греческих философов, постепенно привели их последователей к атомизму. Путь развития идей о том, что мир состоит из малых частиц, о дискретной (прерывной) сущности вещества, от первых предчувствий до сегодняшней теории строения материи, богат событиями, отражающими узловые конфликты истории человеческой мысли. Поэтому на развитии идей атомизма и кинетической теории строения вещества мы остановимся подробнее. На этом пути был особенно обилен отсев ложных шагов, особенно беспощадна борьба мнений.

Прежде всего расшифруем, что значит кинетическая теория. Вот что говорит об этом Большая Советская Энциклопедия: это «отдел теоретической физики, задачей которого является объяснение свойств газов на основании законов движения и взаимодействия их молекул». Философ Лейбниц, подчеркивая, что речь идет о движении, о «жизни» частиц материи, даже называл кинетическую энергию «живой силой». В наше время этот термин вышел из употребления, как неточный и вводящий в заблуждение. Но, рассуждая о таких свойствах веществ, как теплопроводность, вязкость, испарение, кристаллизация и о всех других проявлениях и формах движения материи, ученые исходят из твердого убеждения в ее прерывистой — дискретной структуре и в непрерывном движении ее мельчайших частиц. Первыми здесь были Левкипп и его ученик Демокрит, провидевшие, что в природе нет ничего, кроме атомов и пустоты. Все состоит из атомов. Но идеализм Платона и Аристотеля одержал верх, вытеснив учение атомистов на долгие века. Они скупали и уничтожали рукописи Демокрита и его учеников. Человек, следовавший учению атомистов, рисковал не только репутацией, но и жизнью. Лишь Эпикур и его последователь Лукреций Кар нашли в себе смелость развивать и пропагандировать идеи атомистов.

Учение Аристотеля, внесшего в физику преимущественно ошибки и фантастические догмы, в течение веков тяготело над умами людей. Только в первой половине XV века Николай Кребс, известный больше как Николай Кузанский сделал попытку возродить атомизм. Этот разносторонний ученый, утверждавший движение и вращение Земли и бесконечность познания, оказал большое влияние на мыслителей Возрождения, включая

Коперника и Бруно. Но атомизм с трудом завоевывал позиции даже в наиболее просвещенных умах того времени. Лишь через полтора века врач Заннерт из Бреславля объяснял испарение воды тем, что ее атомы покидают поверхность, образуя пар.

Примерно в это же время Галилей первым после многовекового умалчивания излагает атомистическое учение Демокрита. В сочинении «Пробирщик» он объяснял тепло движением частиц. Правда, это еще не атомы и не молекулы вещества, но частицы пламени, которые переходят в нагреваемые тела.

Ньютон заставил всех признать силы притяжения основополагающим свойством материи. Идеи атомизма проявляются во многих его воззрениях, в частности, в корпускулярной теории света.

Ближе всех к современной теории материи подошел Ломоносов, как к кинетической теории тепла, так и к кинетической теории газов. Он пишет: «Очевидно, что отдельные атомы воздуха, взаимно приблизившись, сталкиваются с ближайшими... и когда они находятся в соприкосновении, вторые атомы друг от друга отпрыгнули, ударились в более близкие к ним и снова отскочили; таким образом, непрерывно отталкиваемые друг от друга частыми взаимными толчками, они стремятся рассеяться друг от друга».

Близок по своим воззрениям к Ломоносову Боскович, книгу которого Ломоносов приобрел в конце своей жизни. Рожер Иосиф Боскович работал главным образом в Италии и несколько лет в Париже, где он мог впитать самые новые воззрения своего времени. Размышляя об устройстве материи, он пришел к мысли, что вещество состоит из атомов — точек. Не имея протяженности, они обладают инерцией и являются источниками сил. На малых расстояниях действует сила притяжения, но точки не могут соприкоснуться, ибо сила притяжения стала бы при этом бесконечно большой. Значит, на самых малых расстояниях преобладает сила отталкивания. С увеличением расстояния сила отталкивания уменьшается до нуля и переходит в силу притяжения.

Если отбросить сравнение молекул с точками, это вполне современная позиция. «Подтвердилось предположение о том, что молекулы на больших (по атомным масштабам) расстояниях притягиваются друг к другу, тогда как при тесном сближении между ними появляется сильное отталкивание» (БСЭ).

Боскович считал, что на небольших расстояниях таких переходов отталкивания в притяжение может быть несколько, но затем преобладающим становится всеобщее тяготение Ньютона. На этой основе Боскович объяснял сцепление, упругость и существование твердых тел. Работа Босковича не встретила признания и была забыта. Впоследствии лишь один из известных физиков — Фарадей отозвался о ней с похвалой.

Попытку сочетать древнюю атомистику с новой физикой предпринял Лесаж, утверждавший, что эпикурейцы могли чисто геометрическим путем прийти к закону тяготения. На этом пути он к 1784 году построил стройную систему, которая, однако, оказалась в стороне от дальнейшего развития науки — объясняя известное при помощи сложных построений, она не могла указать пути дальнейшего развития и предсказывать новые, еще неизвестные закономерности.

Современный атомизм пришел в науку из химии. Бойль опирался на атомы, чтобы объяснить, как из химического соединения вновь образуются его составные части. Решительный шаг в обосновании атомизма сделал в 1808 году Дальтон, объяснив, как, признав существование атомов можно понять кратные отношения, в которых химические вещества объединяются между собой при образовании различных соединений.

Почти неизвестный физик, Уотерстон (он даже не упоминается в большинстве книг по истории науки) в 1845 году закончил исследование, содержащее многое из того, что составляет современную кинетическую теорию газов. Его работу не поняли. Королевское общество отказалось опубликовать этот труд. Он увидел свет лишь в 1892 году благодаря замечательному физику лорду Релею.

В 1855 году появился трактат под названием «Теория атомов», в котором его автор — физик, физиолог и философ — Густав Фехнер, изложил причудливую смесь взглядов,

претендовавших на то, что свойства природы можно понять путем логических рассуждений и современной ему физики. Атомы нужны, писал он, для понимания свойств вещества и эфира, атомами являются и души — единицы психического мира. Но эпоха беспочвенных умозаключений закончилась. Идеи Фехнера вели не к столбовой дорожке, а в тупик.

Нельзя, конечно, думать, что кинетическая теория возникла в результате внезапного озарения одного или двух людей. По существу, она явилась результатом попыток объяснить с атомистической точки зрения те фактические сведения, которые накапливались в течение веков из наблюдений природы и специально поставленных экспериментов и постепенно сложились в феноменологические (описательные) теории. Авторы таких теорий, следуя Ньютону, стремились установить зависимость между различными физическими величинами и свойствами, не ставя перед собой цели выяснения причин и «механизмов», их вызывающих, не пытаясь создать гипотезы.

Наибольших успехов достигли феноменологические теории, объясняющие свойства газов. Первые шаги Торричелли и Паскаля привели к пониманию роли атмосферного давления. Блестящий экспериментатор Бойль в 1672 году установил, что объем сжимаемого воздуха при постоянной температуре обратно пропорционален давлению. Через четыре года Мариотт в результате тонких измерений пришел к тому же результату и придал ему современную форму, известную каждому школьнику. Папен, построив паровой котел и снабдив его предохранительным клапаном, обнаружил, что температура кипения воды повышается с давлением, и правильно связал это с изменением давления насыщенного пара.

Дальтон и Гей-Люссак установили равенство теплового расширения различных газов. Гей-Люссак определил, что объем газов пропорционален их температуре, и измерил коэффициент пропорциональности, получив величину $1/267$, достаточно близкую к современному значению $1/273$. Комбинируя этот результат с законом Бойля— Мариотта, Клапейрон получил уравнение, связывающее давление, объем и температуру газа. Во всех случаях произведение давления на объем, деленное на температуру, оказывалось постоянной, величиной. Это была удивительная универсальная постоянная, единая для всех известных газов.

Среди хаоса наблюдений начал проявляться порядок — свидетельство единства законов природы...

Но каков этот порядок?

Постепенно, передавая друг другу эстафету все усложняющихся задач, ученые научились описывать свойства и поведение газов, познанные при наблюдении природы и, главным образом, в результате тщательно проведенных опытов. Математические формулы, коэффициенты которых получены из опыта, формулы, позволяющие предсказывать результаты новых опытов, — таков идеал феноменологических теорий.

Вслед за Ньютоном естествоиспытатели в течение долгого времени считали создание таких теорий единственной целью науки. Их девизом был вопрос «как?». Они не ставили перед собой задачи выяснить, почему получаются те или иные формулы, вследствие чего опыт дает те или иные значения коэффициентов. Никто не пытался найти более глубокие принципы, которые позволили бы предвычислить эти коэффициенты. Пример с газовой постоянной характерен для этого времени. Ее численное значение уже было известно из опыта. Но почему комбинация — произведение давления газа на его объем, деленное на температуру газа, — одинакова для всех газов? Это оставалось таинственным фактом.

Периоды накопления информации закономерны. Они подготавливают момент, когда количество знаний переходит в их качество.

Рождение современной кинетической теории относят к 1848 году, когда Джоуль, ничего не зная о работах Ломоносова, выступил с докладом «Некоторые замечания о теплоте и строении упругих жидкостей». Члены Манчестерского философского общества без особого интереса выслушали утверждение бывшего пивовара о том, что «упругая сила или давление должны представлять собой эффект движения частиц, из которых состоит всякий газ».

Джоуль утверждал, что таким путем можно объяснить закон Бойля — Мариотта. Хотя

доклад и был напечатан в трудах общества, но эти труды вряд ли прочел кто-нибудь, кроме некоторых из его членов.

Прошло восемь лет. В 1856 году Крениг опубликовал «Очерки теории газов», в которых пишет, что каждая молекула, ударяясь о стенку сосуда, передает ей свой импульс, пропорциональный массе и скорости молекулы. Суммируя эти импульсы, он вычисляет величину давления газа и впервые получает связь между объемом газа и его давлением, как следствие движения молекул газа. Следствие и причина были увязаны. Обнаружилась ниточка, объединяющая поведение газа с его сущностью как коллектива отдельных частиц. Современников потрясла возможность вычислить величину универсальной газовой постоянной.

Как видно, пришла пора сбора урожая в исследованиях газов. В 1857 году выходит работа Клаузиуса «О роде движения, который мы называем теплотой». Здесь Клаузиус впервые дает не только ясное и последовательное изложение молекулярно-кинетического подхода, но облакает его в математическую форму. Эмпирические законы, установленные опытным путем, и описательные теории получили в молекулярно-кинетической трактовке прозрачное наглядное истолкование.

Представление об атомарном строении газа и о связи движения его атомов с температурой и давлением перестало быть гипотезой. Оно сравнялось по значению с фундаментальными принципами, лежащими, в соответствии с методологией Ньютона, в основах науки. В отличие от отвергаемых Ньютоном гипотез, предназначенных для объяснения единичного явления, молекулярно-кинетическая гипотеза объясняла огромный круг явлений, дотоле казавшихся независимыми. Давала возможность, подобно принципам Ньютона, вывести законы этих явлений. Она даже превосходила принципы Ньютона — позволила вычислить величину постоянной в законе Клапейрона. А постоянные в законах Ньютона и в других законах, полученных на основе его принципов, нужно было независимо определять путем дополнительных опытов.

Начиналась новая эра в науке. Открылись вдохновляющие возможности продвижения по пути, указанному Ньютоном. При этом сохранилось стремление Отыскивать законы, «причины которых (как писал Ньютон) неизвестны», не дожидаясь выяснения этих причин.

Неизвестным оставался «пустяк» — природа сил, действующих между молекулами. Но никто не думал возвращаться к гипотезам Босковича или Лесажа. Не нужно было придумывать новых гипотез о внутреннем строении молекул. Достаточно представить себе, что молекулы при соударении ведут себя как маленькие бильярдные шары и применять к вычислениям законы соударения упругих шаров. Дальше все шло само собой при помощи геометрических построений и вычислений. Запомним эту аналогию: молекулы подобны упругим шарикам. Эта аналогия повинна во многих открытиях и во многих заблуждениях. Она и успокоила ученых и вселила в них то беспокойство, ту неудовлетворенность, которая привела их в конце концов на порог квантовой эры...

...Публикация статьи Клаузиуса вызвала такой резонанс, что Джоуль поспешил еще раз опубликовать свой Манчестерский доклад 1848 года — теперь в одном из наиболее авторитетных журналов «Философический мэгэзин». Джоуль хотел, чтобы все знали о том, что первый вклад в новую и весьма перспективную теорию сделал именно он.

Конечно, не все в статье Клаузиуса было совершенно. Для упрощения расчетов он принимал, что все молекулы движутся с одинаковой скоростью. Ему возразил Максвелл. В докладе Британской ассоциации Максвелл в 1860 году показал, что это не верно. Доклад был опубликован в том же журнале, в котором опубликовал свой доклад Джоуль. Но в отличие от статьи Джоуля, где был лишь намек, публикация Максвелла вошла краеугольным камнем в фундамент современной науки. В ней содержались формулы, при помощи которых можно получать правильные результаты.

Максвелл исходит из модели «неопределенного количества малых, твердых и совершенно упругих шаров, действующих друг на друга только во время столкновения».

«Если окажется, — пишет он, — что свойства подобной системы тел соответствуют

свойствам газов, то этим будет создана важная физическая аналогия, которая может привести к более правильному познанию свойств материи». Далее Максвелл, следуя древней традиции, формулирует ряд «Предложений» и анализирует их, преимущественно методами геометрии.

В частности, он показывает, что при случайном соударении двух шаров все направления их последующего движения равновероятны. В следующем «Предложении» он решает задачу о распределении скоростей таких шаров, а значит, и молекул — одно из достижений, обессмертившее его имя. Далее он получает закон Авогадро, определившего из опыта число молекул, содержащихся в заданном количестве вещества. Первоначально Авогадро сформулировал результаты своего опыта так: плотность газов при одинаковых давлениях и температурах пропорциональна их молекулярным весам. Вычисления показали Максвеллу, что масса любого вещества, численно равная его молекулярному весу, всегда содержит одинаковое количество молекул.

Максвелл проводит расчеты многих газовых величин, ранее известных из опыта, и, в большинстве случаев, приходит к результатам, совпадающим с опытом. Однако, вычислив коэффициент трения текущего газа, он приходит к замечательному выводу о том, что этот коэффициент не зависит от плотности газа. Максвелл пишет: «Этот вывод из математической теории является крайне поразительным, и единственный опыт, с которым я встретился в этой области, как будто не подтверждает его».

Но Максвелл верит, что теория, объясняющая без дополнительных гипотез множество несвязанных явлений, должна быть правильна. В этом случае контрольный эксперимент показал, что опыт, известный Максвеллу, оказался ошибочным. Все другие опыты, специально поставленные для проверки теории, подтвердили ее предсказания. Для точности нужно добавить: в тех условиях, в которых применим прежний, классический подход. Но это уточнение потребовалось много позже.

Вскоре Максвелл предсказал, что его теория позволит определить размеры молекул и их количество в данном объеме при известной температуре и давлении. В 1865 году Лошмидт выполнил эту задачу.

Конечно, о и раньше, начиная с Ломоносова, ученые определяли размеры молекул, исходя из размеров тонких листков металлов и кварцевых нитей. Получались, главным образом, оценки верхних пределов — «не больше, чем». Теперь положение изменилось. Теория дала регулярный метод, а потом появились и другие способы, основанные на модели молекул — упругих шарах.

Молекулярно-кинетическая теория газов трудами Максвелла и Больцмана, Гиббса и Планка переросла в кинетическую теорию материи, охватившую не только газы, но и жидкости и твердые тела. Ее основным методом стала математическая статистика. Ее результаты объясняли все известные ранее факты и предсказывали новые, которые подтверждались специально поставленными опытами.

Кинетическая теория материи стала таким же неотъемлемым элементом классической физики, как механика Ньютона и электродинамика, созданная Максвеллом после его работ по кинетической теории.

Казалось бы, новая точка зрения на строение вещества окажется венцом такого гармоничного сооружения, как классическая физика, и физиков ожидает золотая эра пожинания плодов. Но...

Взрыв

Кинетическая теория материи сыграла роль бомбы — взрыв обнажил внутренние противоречия, скрытые в классической физике. Обычно первые конфликты в этой солидной системе знаний связывают с теорией излучения, приведшей Планка к теории квантов.

Однако все началось раньше...

Прделаем два мысленных опыта. Представим горизонтально расположенный цилиндр

с поршнем внутри. Идеальная теплоизоляция — тепло не может ни уйти из цилиндра, ни проникнуть вовнутрь. Поршень движется без трения. Слева от поршня идеальный газ, справа пустота. Идеальный газ — мельчайшие частицы, подобные бильярдным шарам, не действующие друг на друга, пока не соприкоснутся... А соприкоснувшись, разлетаются, как положено шарам. Так в реальности не бывает, но у нас опыт мысленный, очищенный от второстепенных процессов.

Итак, давление газа медленно перемещает поршень направо. Его шток через какую-то систему связан с грузом, поднимая который он совершает работу. Ничего необычного в таком механизме нет, это аналог модели паровой машины, которую рассматривал еще Карно.

Кинетическая теория объясняет: работа осуществляется за счет расширения газа. При этом газ охлаждается. Ударившись и отразившись от отодвигающегося поршня, молекулы теряют скорость (точно так же теряет скорость теннисный мяч, если игрок примет его на уходящую ракетку вместо того, чтобы ударить ею по мячу). Уменьшение скорости молекул проявится в падении их температуры. Уменьшится и давление газа — ведь объем его растет.

Дойдя до стенки цилиндра, поршень остановится. Как показал еще Карно, процесс протекает в одном направлении, с потерей тепла. Мы, знающие больше, чем Карно, можем сказать — все происходит в соответствии с законами термодинамики. Опыт можно провести в обратном направлении, приложив к поршню силу, которая вернет его в исходное положение. Передвигаясь справа налево, поршень будет действовать на молекулы газа, как «атакующая» ракетка на теннисный мяч, — молекулы получают дополнительную скорость, газ будет нагреваться, его давление (из-за уменьшения объема газа) расти. Но запомним: все это происходит не само по себе, не за счет тепловой энергии молекул, а за счет работы внешней силы.

А можно ли вернуть газ обратно без помощи поршня? Без внешней силы? Ответ настолько не прост, что нам нужно проделать еще один мысленный опыт.

Заменим поршень скользящей перегородкой, которую можно вытащить через узкую щель в стенке цилиндра, не выпустив из него газ. Первоначально газ был в левой половине. После удаления перегородки он займет весь цилиндр. Что изменилось по сравнению с первым опытом? Давление газа, естественно, упало — ведь увеличился объем. А температура? Она не изменилась. Молекулы не теряли скорости на уходящем поршне. Газ не совершал работы. Он просто расширился, не встречая сопротивления, и долетел до неподвижной правой стенки цилиндра. Теория говорит: все в порядке, энергия газа не изменилась, ведь она зависит от числа молекул и от их скорости, а они остались прежними... Так, может быть, газ в этом случае способен без помощи поршня возвратиться в исходное состояние? В то состояние, когда перегородка возвращена на место, а газ находится с одной ее стороны?

Молекулярно-кинетическая теория, основанная на модели соударения упругих шаров, не запрещает такой возможности. Ведь соударения упругих шаров подчиняются законам Ньютона, которые совершенно симметричны по отношению к направлениям любых механических процессов.

Несомненно, каждому интуитивно ясно, что практически невозможно изменить на противоположное направление движение каждой молекулы газа и таким способом (в соответствии с законами Ньютона) привести газ в исходное состояние. Но нет ли, помимо этой «практической трудности», какого-либо глубокого принципиального запрета, препятствующего выполнению этой задачи?

Возвратим на место нашу скользящую перегородку, но предварительно снабдим ее небольшим отверстием, за-закрывае-мойтакой же скользящей маленькой заслонкой. Теперь, открывая заслонку, когда к ней подлетают молекулы движущиеся справа налево, и закрывая ее, если молекулы подлетают к ней слева, мы можем вновь собрать все молекулы в левой половине цилиндра. Какие возможности открываются перед нами! Мы можем соединить обе половины цилиндра Тонкой трубкой и установить в ней маленькую турбинку. Тогда газ, перетекая по трубке слева направо, будет вращать турбинку, совершая даровую работу, а мы,

не совершая никакой работы, а лишь управляя заслонкой, будем постоянно возвращать его в исходное состояние.

Максвелл, обдумывавший подобный мысленный эксперимент, знал, что такое устройство было бы вечным двигателем. Ведь, по условию, трения нет, и заслонка, не затрачивая работу, поддерживает разность давлений между обеими половинами цилиндра. А за счет этой разности давлений работает турбинка. Это вечный двигатель, дающий даровую работу! Следовательно, заключил он, такой механизм не может работать, если им не управляет некое сверхъестественное существо, способное сортировать молекулы, не совершая работы.

Это значит, что молекулярно-кинетическая теория, основанная на модели идеально упругих шаров, подчиняющихся законам Ньютона, не может описать работу паровой машины, не прибегая к помощи термодинамики. От молекулярно-кинетической теории нет прямого пути к термодинамике и ее законам. Законы термодинамики не могут быть получены из механики Ньютона. Связь между ними долго казалась непостижимой...

Так в обиход науки вошел «дьявол Максвелла», воображаемый механизм, который совершил бы чудо получения работы без ее затраты, если бы мог существовать.

Максвелл придумал своего нечистого в 1871 году и был в полной уверенности, что тут же его уничтожил. Но «дьявол» оказался хитрее и коварнее. Он покинул Максвелла, так как тот в него не поверил, и начал поиски сторонников подоверчивее.

Козни дьявола

Он шептал очередной жертве: увы, со скользящей заслонкой ничего не вышло. Но ты умный, ты придумаешь... И энтузиаст придумывает. Вместо скользящей заслонки он помещает в отверстие качающуюся заслонку — легкий лепесток, подвешенный к оси и снабженный пружинкой, удерживающей заслонку в положении «закрыто». Пружинка так слаба, что каждая молекула может открыть ее своим прикосновением. Молодец, шепчет дьявол, теперь недолго до вечного двигателя. Думай дальше. Автор нового механизма замечает, что молекулы ударяются в заслонку с обеих сторон и проскакивают в обоих направлениях. Пустяк, решает он, можно сделать ее чуть больше чем отверстие и повесить с левой стороны перегородки. Тогда при ударе справа она пропустит молекулу, а обратно нет! «Тепло», как говорят в детской игре, когда цель близко.

Но нет. Если заслонка идеальная, то пружинка не сможет удержать ее закрытой. Пружинка действительно вернет ее на место после того, как толчок молекулы заставит ее открыться. Но, возвратившись к перегородке, заслонка, как идеальный упругий шарик на идеальной упругой плите, будет прыгать вечно! Пружинка, возвращая ее, ударит ею о стенку, и она отскочит обратно с той же скоростью, какую ей первоначально придала молекула. А если она будет прыгать вечно, то молекулы смогут свободно пролетать через отверстие в обе стороны.

Думай, думай, шепчет дьявол. Заслонка слишком идеальная. Нужно ввести трение, и она остановится. Дьявол хитер. Трение действительно нарушает симметрию механических процессов, делает их необратимыми. Ведь трение преобразует механическую энергию в тепловую. Трение вводит в игру термодинамику с ее Вторым началом, утверждающим необратимость тепловых процессов.

Однако, введя трение, нужно присмотреться к процессу повнимательнее. Откуда берет энергию пляшущая заслонка, какая энергия превращается в тепловую? Это часть энергии молекулы, толкнувшей заслонку. Упростив задачу, мы не учли, что, толкая заслонку, молекула отдает ей часть энергии и влетает в левую половину цилиндра с уменьшенной скоростью. Так, в первом опыте молекулы, толкая поршень, отдавали ему часть своей энергии. А потеря скорости связана с понижением температуры. Конечно, для отдельной молекулы эта связь имеет чисто формальный смысл. Но для того, чтобы турбинка заработала, налево должно перелететь достаточно много молекул. Значит, температура газа

слева будет уменьшаться по мере прибавления медленных молекул. Ведь при столкновениях со старожилками они уменьшат среднюю скорость всех молекул, а это уже настоящее падение температуры... Но не только это работает против изобретателя. Рассуждение проведено для одиночных молекул, подлетающих к заслонке, когда она закрыта. Но в то время когда заслонка открыта, в реальных газах сквозь отверстие будет пролетать избыток молекул с той стороны, где давление больше, сводя на нет способность механизма создавать поток молекул в избранном направлении.

Дьявол не без успеха прельщал многих возможностью создания вечного двигателя. Сперва простого, не считающегося с Первым началом термодинамики. Потом более сложного, не считающегося со Вторым началом. Дьявол пытается скрыть от человека, что к любым машинам, «производящим» энергию, нужно подводить ее извне. Ведь в каждой замкнутой системе ее запас постоянен, могут изменяться лишь ее формы, переходя одна в другую. Но тепловая энергия занимает при этом особое положение. Ее нельзя без остатка преобразовать в другие формы энергии.

Невозможность вечного двигателя покоится не только на отрицательном опыте многих изобретателей, хотя этого было достаточно для Стевина и Карно, считавших эту невозможность не подлежащей сомнению. После создания термодинамики эта невозможность воплотилась в принцип сохранения энергии, называемый Первым началом термодинамики, и во Второе начало термодинамики, указывающее направление реальных тепловых процессов в природе. Оно покоится на утверждении Карно: в реальных процессах тепло может самопроизвольно протекать только от нагретых тел к холодным, а не наоборот.

Но человек слаб, а дьявол хитер. Он вновь и вновь побуждает людей пытаться построить вечный двигатель, пусть не вечный двигатель, нарушающий закон сохранения энергии, а хотя бы вечный двигатель, обходящий Второе начало термодинамики.

Еще сравнительно недавно известному американскому физическому Сцилларду пришлось специально доказывать, что никакой механизм, даже снабженный источником света и фотоприемником, которые помогли бы дьяволу заранее получить информацию о движении молекул, не сможет управлять заслонкой без затраты энергии, не сможет привести к созданию вечного двигателя. Но хитрость дьявола проявляется не только в подсказке заманчивых идей. Он способен притаяться, давая людям возможность впасть в гордыню, чтобы потом ввергнуть их в адские сомнения.

Снова подвохи нечистого

Молекулярно-кинетическая теория, несмотря на выявившиеся трудности, шагала от успеха к успеху без единого поражения. Все казалось ей доступным, нужно лишь потрудиться и разобраться в деталях. Она позволила определить теплоемкость газов и вычислить величину универсальной газовой постоянной. Причем все эти вычисления поражали своей простотой, доступностью. Никакой мистики чисел! За основу надо взять величину газовой постоянной, пересчитанную на одну молекулу, и учесть, что на каждую степень свободы придется по половине этой газовой постоянной. Молекулы одноатомных газов могут перемещаться в пространстве по горизонтали, по вертикали и перпендикулярно этим направлениям. Значит, они обладают тремя степенями свободы. Чтобы получить их теплоемкость, нужно три раза взять половину газовой постоянной — $3 \cdot \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$. Для двухатомных газов, которые могут не только перемещаться в пространстве, но и вращаться в двух плоскостях (то есть имеют пять степеней свободы), получается $5 \cdot \frac{1}{2} = \frac{5}{2}$ газовой постоянной.

Удивительно, но и для твердого тела оказалось справедливо то же правило вычисления теплоемкости. Кинетическая теория указывает простейший путь к ответу. Вот он: каждый атом твердого тела может колебаться в трех направлениях вокруг своего положения равновесия — значит, у каждого атома и здесь по три степени свободы. Эти движения дают вклад в теплоемкость, составляющий $\frac{3}{2}$ газовой постоянной. Но при колебаниях атомов в

твердом теле следует учесть не только энергию их движения. При колебаниях атомов работают и упругие силы, причем потенциальная энергия упругих сил точно равна кинетической энергии колебаний атомов. Значит $3/2$ нужно удвоить. Получается ровно 3, независимо от конкретных свойств атомов.

Соблазнительно просто, а главное — в полном соответствии с давно известным законом Дюлонга и Пти, которые еще в 1819 году установили, что для любого твердого тела произведение удельной теплоемкости на атомный вес постоянно. Хотя этот закон и был известен, но оставался совершенно непонятным и загадочным. Теплоемкость всех тел одинакова, утверждает этот закон. Многие ученые проверяли его для многих металлов в широком интервале температур и обнаружили хорошее соответствие. Не точное, но достаточное, считали они.

И тут дьявол снова вышел на сцену. Подумайте, сказал он иронически: как все замечательно получается! По половине газовой постоянной на каждую степень свободы... Хорошо, давайте писать $R/2$, чтобы не тратить много слов. Итак, теплоемкость одноатомных газов равна $3/2R$, ведь у них 3 степени свободы. Это у вас получилось точно. А почему для двухатомных газов не получается точно $5/2R$? Ведь у них 5 степеней свободы на каждую молекулу. А почему у твердых тел не точно $3R$, ведь у них 6 степеней свободы на каждый атом. Проверьте — во многих случаях расхождение заметно превосходит ошибки измерений. Что-то не ладно в самих основах «безупречной» молекулярно-кинетической теории!

И дьявол начинает издеваться: вы говорите, по $R/2$ на каждую степень свободы! Но ведь теория врет и для одноатомного газа. Ведь вы считаете атомы маленькими, но не точечными. Вы даже измеряете их размеры. Но если они шарики, то они не только летают, но и могут вращаться, значит, у них не по 3, а по 6 степеней свободы. Значит, вы неправильно рассчитали их теплоемкость. Должно быть не $3/2R$, а вдвое больше — $3R$. А опыт дает $3/2R$! Как быть? Идем дальше. Если вращается вокруг своей оси двухатомная молекула, то у нее не 5 степеней свободы, а 6. Кроме того, молекула не абсолютно твердое тело. Ее атомы колеблются. Тогда у двухатомной молекулы 7 степеней свободы. Ее теплоемкость должна быть $7/2R$, а опыт чаще всего дает $5/2R$. Но что это за закон, который то выполняется, то нет? Взгляните в справочник, для каждого газа опыт дает свое значение теплоемкости, причем оно не постоянно, а зависит от температуры! Чему вы так наивно радовались?

Как же нужно вести расчет?

Так величайший триумф классической физики грозил обернуться катастрофой, ибо это были вопросы без ответа.

Ах, как не прав был Филипп Жолли, учитель Планка, профессор в Мюнхене, говоря, что теоретическая физика к началу XX века завершила свое развитие и осталось лишь уточнить детали. И почему-то ему никто не возражал. Более того, многие разделяли эту точку зрения. Даже всеми уважаемый Дж. Дж. Томсон, президент Королевского общества Англии, прощаясь с XIX веком, выразил ту же мысль почти теми же словами — наука вошла в спокойную гавань, все кардинальные вопросы решены, осталось лишь уточнить детали.

Если кто и возражал, то только дьявол, он не просто намекал, но ясно указывал, где под фундаментом кинетической теории находится песок. Он, правда, делал вид, что помогает. Подсказывает и предупреждает...

Вот подсказки. Алмаз не подчиняется закону Дюлонга и Пти, это стало известно уже через десять лет после того, как они опубликовали свой закон. Потом оказалось, что и для других твердых тел наблюдаются отклонения. Много позже, в 1875 году, Вебер показал, что теплоемкости алмаза, бора и кремния, для которых отклонения при комнатной температуре особенно заметны, по мере нагревания приближаются к закону Дюлонга и Пти, причем приближаются постепенно, как будто в массе атомов включается все больше и больше степеней свободы, которых недостает при комнатной температуре. А при понижении температуры отклонения от закона Дюлонга и Пти становятся еще более заметными. Но и после этого, до конца девятнадцатого века, более 25 лет эти парадоксы оставались

неразъясненными, и к ним прибавлялись все новые.

Трудно сказать, сколько мог бы еще торжествовать дьявол, если бы он не довел дело до петли, до тепловой смерти Вселенной. Но когда дело дошло до петли, ученым пришлось разобраться. Но об этом — позже.

МАШИНА СМЕРТИ

Таинство абсолютно Черного

Далее рассказ пойдет о том, как были преодолены козни дьявола против молекулярно-кинетической теории, какой ценой удалось сохранить величественное здание классической физики, едва не рухнувшее под грузом парадоксов. В этой истории тоже основную роль играет некая машина, которая, к счастью, не работала. Ее без всяких дурных намерений создал лорд Релей, создал лишь на бумаге. Заработай такая машина, она «перемолола» бы всю тепловую энергию мира в энергию излучения, «насытившись» только тогда, когда все тела охладились бы до абсолютного нуля.

Многие ученые тщательно анализировали прискорбные результаты ее возможного действия. Если бы такая машина заработала, то могли случиться и другие фантастические события, например: чайник, окрашенный лучшей черной краской, излучал бы видимый свет. Мы наблюдали бы свечение стен в полностью затемненной комнате, не замечая в ней никаких предметов, потому что они светились бы так же, как и стены, совершенно не выделяясь на их фоне.

История этой машины восходит к Кирхгофу, который в 1858 году установил удивительное свойство оболочек, способных идеально удерживать внутри себя теплоту. Если бы такую оболочку удалось изготовить, то, независимо от ее размеров и формы, от свойств находящихся внутри нее тел, все они, в конце концов, пришли бы в тепловое равновесие между собой и с оболочкой — даже если они не соприкасаются ни с нею, ни друг с другом. Обмен энергией между ними осуществляется без касания, только за счет излучения и поглощения. Вывод из такого мысленного эксперимента очевиден: любое тело может не только излучать энергию, но и поглощать ее. Этот мысленный опыт интересен не просто как упражнение ума. Его суть отражает жизнь Вселенной, является прообразом одного из типов взаимодействия составляющих ее тел.

В следующем году Кирхгоф ввел в науку понятие абсолютно черного тела — тела, которое способно полностью поглощать все падающее на него излучение. Оказалось, что такое тело может существовать. Кирхгоф придумал и способ, как сделать его модель. Это не сложно. Достаточно изготовить замкнутую полость из какого угодно материала и проделать в стенке небольшое отверстие. Тогда любое излучение, попавшее в отверстие, полностью поглотится. Произойдет это так. Вошедшее излучение попадет на внутреннюю поверхность стенки полости и частично поглотится ею. Остаток рассеется в разные стороны и попадет на другие части внутренней поверхности и, после нескольких скачков, поглотится полностью.

Обычно внутренние стенки такой полости делают темными и шероховатыми, чтобы доля поглощенного света была велика, а рассеяние было бы равномерным по всем направлениям. Однако даже если стенки сделать зеркальными, результат изменится не сильно. Ведь лучшие посеребренные зеркала отражают свет не полностью, а только на 95 %. Легко подсчитать, что интенсивность отраженного света в полости быстро уменьшается по мере роста количества отражений.

Подобное устройство было названо абсолютно черным телом, ибо, независимо от цвета, оно поглощает абсолютно все излучение, падающее на отверстие, и не отражает ничего. Но абсолютно черное тело и его модель — полость с малым отверстием — не только поглощают, но и излучают. Ведь через отверстие в стенке полости излучение «выливается» наружу так же свободно, как «вливается» вовнутрь. А интенсивность излучения внутри

полости зависит только от температуры ее внутренних стенок. Название «абсолютно черное тело» звучит парадоксально, если учесть, что отверстие может сиять ослепительно ярко, когда внутренняя поверхность оболочки раскалена, а внешняя поверхность окружена теплоизоляцией, которая снаружи остается холодной.

Так Кирхгоф нашел простой способ проверить свой мысленный эксперимент с замкнутой, абсолютно изолированной полостью.

Многих заинтересовал вопрос о том, каковы свойства излучения абсолютно черного тела, но ответить на этот вопрос оказалось далеко не просто. Только через 19 лет венский профессор Иозеф Стефан вычислил первую характеристику такого излучения. Оказалось, что полная энергия, излучаемая абсолютно черным телом, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Еще через пять лет один из крупнейших теоретиков Больцман, тоже работавший в Вене, показал, что закон, обнаруженный Стефаном, может быть получен как следствие законов термодинамики - надо учесть давление излучения, рассчитанное Максвеллом из его уравнений электромагнитного поля.

Закон Стефана — Больцмана неоднократно подтверждался различными опытами. Было известно также, что распределение энергии излучения абсолютно черного тела по спектру не зависит от свойств материала его стенок и имеет вид несимметричной горбатой кривой. Она начинается с нуля на очень коротких волнах, поднимается к максимуму и затем падает (но не до нуля) по мере удлинения излучаемых волн. Кривая выглядит острой и высокой при больших температурах, но плавной и низкой, если температура мала. При повышении температуры максимум заметно смещается в сторону коротких волн... Все это было известно, но никто не знал, почему это так...

Прошло еще десять лет, и Вильгельм Вин, исходя из мысленных экспериментов, пришел к удивительному и непонятному результату. Произошло это так. Вин попытался определить, как изменяется при нагревании излучение абсолютно черного тела. Он прослеживал изменения по отдельным интервалам длин волн. И обнаружил, что интенсивность излучения вовсе не пропорциональна четвертой степени температуры, как это следует для всего суммарного излучения. Следует, если верить Стефану...

Вин нашел, что энергия излучения, измеренная в узких интервалах длин волн, должна быть пропорциональна пятой степени температуры, умноженной на какую-то неизвестную функцию длины волны и температуры. Если это не так, утверждал Вин, то будет нарушено Второе начало термодинамики. Но в то время все квалифицированные ученые знали, что Второе начало термодинамики должно соблюдаться. Значит, это так.

Закон Вина представлялся таинственным не только потому, что непонятным был скрытый в нем смысл. Никому не удавалось найти вид функции, вид, при котором закон не противоречит опыту.

Вин сам попытался найти эту функцию, но потерпел неудачу. Любые функции, которые ему удавалось найти, опираясь на известные в то время законы физики, приводили к резкому противоречию с опытом. Единственное, что ему удалось получить из нового закона, без противоречия с опытом, это объяснение смещения горба кривой Стефана — Больцмана при изменении температуры. Впрочем, он нашел не объяснение, не причинную связь со свойствами вещества или излучения, а лишь математическую связь между двумя величинами: произведение абсолютной температуры тела на длину волны, соответствующую максимуму кривой интенсивности излучения, остается постоянным. Совсем в духе Ньютона — важно найти математический закон, даже если причины остаются скрытыми. Много лет спустя Вин получил Нобелевскую премию за исследования свойств излучения, главным образом за формулировку закона смещения этого максимума.

Удивительное положение: закон верен в общем виде потому, что только этот общий вид удовлетворяет Второму началу термодинамики. Но любая попытка придать ему конкретную форму, найти, вид неизвестной функции, приводит к противоречию с опытом...

Задачей заинтересовался лорд Релей. Перебрав варианты расчетов, он пришел к выводу, что закон Вина верен только в области коротких волн и низких температур, а на длинных волнах и при высоких температурах он резко противоречит опыту. Однако Релей подтвердил, что следствие из неверного закона — найденный Вином закон смещения — сохраняет силу, что, впрочем, было уже известно из опыта.

Релей решил начать все сначала, основываясь на работах Максвелла и Больцмана, на общепринятом законе равного распределения энергии по степеням свободы. Он получил новый закон: удельная мощность излучения абсолютно черного тела должна быть пропорциональна абсолютной температуре и обратно пропорциональна четвертой степени длины волны. Формула Релея, полученная из признанной и казавшейся тогда безупречной молекулярно-кинетической теории, расходилась с опытом еще сильнее, чем формула Вина! Из нее не получался даже закон смещения. Кривая стремительно и неограниченно нарастала в сторону коротких волн.

Давая сравнительно хорошее совпадение с опытом на длинных волнах, формула приводила к вопиющему абсурду по мере укорочения длины волны. Из нее, вопреки закону Стефана — Больцмана и вопреки опыту, получалось, что черное тело при любой температуре излучает бесконечную энергию. Значит, любое тело остынет до абсолютного нуля, если не подводить к нему непрерывно бесконечную энергию. Более абсурдные результаты трудно придумать, а ведь они без какой-либо ошибки получены из «безупречной» молекулярно-кинетической теории...

Возникло парадоксальное положение, подчеркивающее, что при любой температуре любое тело должно, исходя из молекулярно-кинетической теории, излучать бесконечную энергию на коротких волнах, более коротких, чем ультрафиолетовые волны. Формула Релея превращала любое тело в тепловую машину, в машину смерти, неудержимо преобразующую без остатка тепло в излучение. Это должен быть необратимый процесс. Все предметы должны сиять фиолетовым пламенем и полыхать коротковолновым излучением. Так в науку ворвался призрак «ультрафиолетовой катастрофы»...

Начались разговоры о тепловой смерти Вселенной, ибо этот процесс может прекратиться только тогда, когда мир остынет до абсолютного нуля. Все понимали, что этого не может быть, что необходимо опровергнуть формулу Релея, иначе придется отказаться от молекулярно-кинетической теории, от всей классической физики!

За дело взялся Макс Планк — физик, первым ставший официальным физиком-теоретиком, он действительно первым в 1885 году занял должность экстраординарного профессора теоретической физики в Кильском университете. Через четыре года Планк получил ту же должность в Берлинском университете, а в 1892 году стал там ординарным профессором. Некоторые еще продолжали считать должность профессора теоретической физики излишней, пишет он в своей автобиографии и продолжает: «Ведь я тогда был среди всех физиков единственным теоретиком... что сделало мое положение не совсем легким». До него, начиная с Галилея, каждый физик, изучая природу, выступал и как экспериментатор и как теоретик. Потом и для физики возникла необходимость разделения труда, специализации не только по областям исследования, но и по методам. Конечно, не перевелись и универсалы, которые по-прежнему объединяют в себе обе ипостаси, и многие из них успешно конкурируют с узкими специалистами.

Позже Планк рассказывал, что он не надеялся на удачу при попытке отыскать неизвестную функцию в законе Вина или при поисках нового закона. Слишком многие уже потерпели неудачу. Он рассуждал так. Закон Вина, несомненно, справедлив в области коротких волн, а закон Релея в области длинных волн. Но они кажутся несовместимыми.

Нужно приняться за дело как-то иначе. И не спешить.

Эмоции сильнее доказательств?

Драматическая история возникновения квантовых идей со временем трансформировалась и обросла рядом стереотипов. Некоторые из них возникали из лучших педагогических побуждений, имевших целью облегчить восприятие идей, столь далеких от привычных и наглядных основ классической науки. Другие родились на последующих этапах, когда кванты уже казались естественными образованиями, без которых невозможно понимание явлений микромира. Недаром «отец квантов» Планк написал: «Обычно новые научные истины побеждают не потому, что их противников убеждают и они признают свою неправоту, а большей частью потому, что эти противники постепенно вымирают, а подрастающее поколение усваивает истину сразу».

Человеческая психика такова, что эмоции сильнее доказательств. Люди менее остро ощутили зверства нацистов из протоколов и репортажей о Нюрнбергском процессе, чем из дневников Анны Франк, маленькой девочки, бесхитростно фиксировавшей течение своих последних дней.

Проследим же историю возникновения квантов по воспоминаниям главного участника. Планк взялся за дело, зная, что всех его предшественников постигла неудача. Будучи чрезвычайно педантичным, трудолюбивым человеком, он решил пройти весь путь с самого начала, приняв за отправные пункты только безусловно достоверное. За достоверное он считал термодинамику и электродинамику. И конечно, закон Стефана — Больцмана, полученный из непосредственного опыта.

Итак, внутри замкнутой полости все тела приходят в равновесие с излучением, подчиняясь при этом Первому и Второму началам термодинамики и уравнениям Максвелла. Безразлично, что находится в полости: куски металла, или камертоны, или вибраторы, незадолго до того изученные Герцем. Для обычных веществ все было ясно. При равновесии внутри полости на любой вид движения атома, молекулы или частицы твердого вещества — вращательное, поступательное, колебательное — на каждую степень свободы приходится одинаковая доля всей находящейся внутри полости энергии, доля, зависящая только от температуры.

Планк был уверен, что задача будет решена полностью, если он применит эту общеизвестную закономерность к конкретному простейшему случаю — к вибраторам Герца. Планк увидел в вибраторе Герца удобную модель излучающего и поглощающего тела. С точки зрения излучения этот вибратор, каким бы ни было его конкретное устройство, является системой с одной степенью свободы. Он поглощает только те электромагнитные волны, которые может излучать. Совсем так, как ведет себя камертон по отношению к звуковым волнам. Удобная модель. Но Планк заподозрил, что, в отличие от камертона, в вибраторе Герца процесс излучения чем-то отличается от процесса поглощения и это позволит вскрыть особенности равновесного состояния внутри полости.

Из этого не вышло ничего. Никаких особенностей не обнаружилось. Больцман, узнав о попытке Планка, объяснил ему, что никаких новых результатов и не следовало ожидать, оставаясь в рамках классической динамики. И в заключение сказал, что решить эту загадку невозможно, не введя в рассмотрение каких-то элементов прерывности, дискретности...

Это указание, туманное, как слова Дельфийского оракула, вошло в сознание или, вернее, в подсознание Планка. Он только не мог придумать, какой смысл можно сюда ввести. Впрочем, и Больцман не мог предложить ничего более определенного. Его мнение опиралось только на интуицию.

Тогда Планк взялся за дело с другого конца, приняв за исходный пункт термодинамику, в которой он чувствовал себя более твердо, чем в электродинамике. Термодинамика показывала, как нужно изучать необратимые процессы, текущие из любого начального состояния в сторону равновесия. Расчеты привели Планка к чрезвычайно изящному результату. Этот результат потряс ученого. Он многократно проверял вычисления. Ошибки не было. Так из термодинамики неожиданно получилось соотношение, эквивалентное закону Вина, верному для коротких волн и неверному для длинных. Значит, термодинамика тоже привела Планка в тупик.

Последовал период мучительных раздумий, в результате которых Планк обнаружил, что, не противореча термодинамике, можно получить решение, справедливое для длинных волн, добившись того, чтобы та же функция оказалась пропорциональной не энергии, а ее квадрату. Но в этом случае результат был бы эквивалентен закону Ре-ля а значит, терял бы смысл в диапазоне коротких волн, приводя к ультрафиолетовой катастрофе.

Тогда Планк решил, хотя бы временно, отказаться от лобового решения коварной задачи и ограничиться полумерой. Он задался целью скомбинировать полученные результаты так, чтобы, приходя со стороны коротких волн к формуле Вина, а со стороны длинных к формуле Релея, они в середине совпадали с известным из опыта законом Стефана — Больцмана. Это было несложно. Достаточно скомбинировать сумму двух решений так, чтобы для коротких волн преобладал первый член с первой степенью энергии, а для длинных — второй с ее квадратом, причем нужно еще ввести общий множитель, чтобы обеспечить совпадение с опытом на средних волнах.

Формула, сработанная таким образом, действительно отражает истинные свойства излучения абсолютно черного тела, соответствует условиям равновесия излучения и вещества внутри замкнутой полости...

19 октября 1900 года Планк представил свои результаты Берлинскому физическому обществу и рекомендовал проверить полученную формулу. На следующее утро его разыскал экспериментатор Рубенс и взволнованно сообщил, что в ночь после заседания он сравнил формулу с результатами своих прежних измерений и всюду нашел удовлетворительное совпадение...

Это был сугубо теоретический расчет, сделанный первым профессиональным физиком-теоретиком. Головоломка с излучением абсолютно черного тела казалась кабинетной забавой, заумью, настолько далекой от повседневной жизни, от потребностей и интересов людей, что могла занимать только коллег Планка. Однако все дальнейшее развитие физики подтвердило потенциальную мощь работы Планка, ее значение для теории и практики.

А когда, уже в наши дни, другие физики-теоретики предприняли неслыханный мысленный эксперимент — решили представить акт рождения Вселенной и воссоздать секунду за секундой все этапы ее развития вплоть до сегодняшнего дня, оказалось, что главной опорой в этой неслыханной попытке стал Планк. Именно его расчеты стали путеводными в составлении сценария, главными героями которого были элементарные частицы, рожденные в момент Большого взрыва, и электромагнитное поле. Именно игра вещества и излучения сформировали мир, который нам посчастливилось увидеть.

В своей замечательной книге «Первые три минуты», переведенной у нас в 1981 году, Стивен Вайнберг, специалист в области элементарных частиц, Нобелевский лауреат, прослеживает, как Вселенная расширялась, как клокотал космический «суп», как варились в нем все те составные части, которые сейчас составляют плоть мира. Весь расчет взаимоотношений между излучением и веществом строится на модели «черного тела».

Вайнберг пишет: «В течение первого миллиона лет или около того, когда излучение и вещество находились в состоянии теплового равновесия, Вселенная должна была быть заполнена излучением черного тела с температурой, равной температуре того вещества, из которого она состояла».

Расширяющаяся Вселенная уподоблена черному телу, заполненному излучением. Энергия в любом интервале длин волн, плавно растет с уменьшением длины волны, достигает максимума, а затем плавно падает. Это распределение Планка, оно универсально и не зависит от природы вещества, которым взаимодействует излучение, а зависит только от его температуры. Сегодня излучение черного тела означает любое излучение, в котором распределение энергии по длинам волн подчиняется формуле Планка независимо от того, действительно ли оно испущено черным телом или нет. И это обстоятельство дает возможность ученым провести еще более немыслимый мысленный эксперимент — проследить не только прошлое нашей Вселенной, но и проанализировать достоверные пути к будущему...

Вайнберг подчеркивает: «Важность планковского расчета выходит далеко за пределы проблемы излучения черного тела, так как в этом расчете Планк ввел новую идею — энергия может существовать в виде отдельных порций, или квантов».

Итак, в расчетах Планка родился квант энергии.

Великая таинственная «аш»

Казалось, следует торжествовать — задача решена. Может быть, другие и могли восторгаться. Но не Планк. Его мучительные сомнения достигли высочайшего предела.

Что это, удачная находка, счастливое сочетание математических кривых, неожиданное решение математического кроссворда или за этим скрывается физический смысл?

«После нескольких недель напряженнейшей в моей жизни работы, темнота рассеялась и наметились новые, неподозреваемые ранее дали». Заметьте, Планку открылась не тихая гавань, не решение, а дальнейший путь в неведомое.

Речь шла о сложнейших взаимоотношениях между неизбежностью и случайностью в природе, нащупанных и введенных в науку Больцманом, человеком с могучей интуицией. Он поразительно красиво примирил Второе начало термодинамики (неизбежность течения всех тепловых процессов лишь в одну сторону — от теплых тел к холодным) с вероятностью случайного всплеска энергии в той или иной области Вселенной, что спасает мир от тепловой смерти. «Примирил» — даже не то слово. Великий немецкий физик подглядел в сложном борении сил природы один из самых таинственных и непостижимых поединков — поединок случайности с неизбежностью.

Неизбежность — предсказанное Вторым началом остывание мира. Оно является следствием принципа, установленного, вернее, понятого, Карно — все виды энергии переходят в тепло без остатка, а тепло течет только в одном направлении — от более горячих тел к менее нагретым и не может полностью переходить в другие формы энергии. Мир остывает — и это неизбежно. Ни бог, ни дьявол не могут спасти мир от постепенного охлаждения. Больцман понял — если мир все еще существует, его спасает случай! Где-то в безбрежном океане остывающей Вселенной обязательно возникает всплеск энергии — и он прервет, нарушит умирание мира, вошьет в него новую энергетическую кровь!

Много позже того как Планк закончил свою удивительную работу вслепую, он тоже будет вынужден признать, что в его формулах скрыта возможность стихийных всплесков энергии, но не где-то в глубинах космоса, а в недрах вещества, в атомах и молекулах. Именно там — время от времени и тоже по закону случая — электроны, вращаясь вокруг ядер и перескакивая с орбиты на орбиту, излучают порции энергии, которые получили название квантов. Подобные процессы можно понять только с новых позиций, приняв новую точку зрения, примирившись с необходимостью дополнить прежние законы, которые добыла классическая физика, новыми законами микромира, квантовыми законами. Классическая физика не знала этих законов. Познать их и учесть предстояло Планку, Эйнштейну, Бору и другим создателям новой, квантовой физики. А познав их, они поняли причины неувязок, которые произошли вследствие попыток изучить микромир с помощью физики, созданной для познания макромира.

Но понимание пришло после. А пока Планк, мучаясь и сомневаясь, боролся с собственной интуицией. Нечто подобное происходило и с Больцманом. Ученые не сразу поверили ему. Было трудно, почти противостоительно признать власть такого ненаучного понятия, как случай, над непреклонным закономерным развитием природы... Открытие Больцмана должно было «созреть». Но сам великий ученый не дожил до этого. Споры, нестерпимое интеллектуальное напряжение, непонимание привели его к самоубийству. Конечно, ученые понимали, что случай — вовсе не произвол. Это не значит, что законы природы ускользают из-под контроля, не подвластны предсказанию. Но предсказать единичный случай тем не менее невозможно. Как же учитывать вероятность того или иного события? В дополнение к статистической теории явлений макромира были созданы — не

одна, а даже две разные — теории, которые помогли физикам ориентироваться в микромире, предсказывать события микромира, и в том числе такие события, как перескок электронов с орбиты на орбиту внутри атома и связанное с этим событием следствие — всплеск энергии, излученной из него. (Оказалось, что многообразные микрочастицы разделены на две группы, принадлежат к двум семействам, что и привело к необходимости двух статистических теорий микроявлений. Но об этом позже.)

Планк установил непреложную истину — излучение энергии возможно только в виде сгустков определенной величины. Эйнштейн показал, что, будучи излученными, они продолжают существовать в форме сгустков электромагнитной энергии, которые позже назовут фотонами. Это будет проявлением нового процесса, незнакомого макромиру, где мельчайшие квантовые сгустки энергии невозможно ощутить порознь и изменения энергии представляются непрерывными. Поэтому-то формулы классической физики, описывающие непрерывные процессы, отказались работать уже на пороге микромира, к которому подошли исследователи занявшись проблемой излучения абсолютно черного тела. Планк нащупал истину интуитивно, пытаясь согласовать формулу излучения абсолютно черного тела с результатами опыта. Чтобы согласовать теорию с реальностью, он ввел в формулу коэффициент, который примирил его теорию с опытом, сделал теорию отражением реальности. Но какой реальности? Этого Планк долго не мог осознать, бунтовал против им же введенного таинственного кванта...

Очень важный момент творчества — интуиция вывела ученого на правильную дорогу, он этого еще не понимает, протестует, сопротивляется. Интуиция помогает человеческому разуму, воспитанному на традициях, а порой и на предрассудках, преодолевать их. Именно интуиция заставила Планка ввести в формулу излучения коэффициент, отражающий дискретную, квантовую структуру энергии.

Планк еще не прозрел истину. Продолжал поиски в традиционных для классической физики рамках... Он даже не подозревал, куда заведет его уступка математической логике. Пока он думал удовольствоваться малым. Для того чтобы понять смысл полученной им формулы излучения абсолютно черного тела, требовалось уточнить значение двух постоянных величин, правильная оценка которых обеспечивала совпадение формулы с опытом.

Исследования показали, что первая постоянная может трактоваться как известная ранее универсальная газовая постоянная, отнесенная к одной молекуле. Планк вычислил ее, а вскоре многие искусные экспериментаторы подтвердили правильность расчета.

Гораздо труднее было со второй постоянной. Она, по тогдашним представлениям Планка, определяла «элементарные области вероятности». Элементарные ступеньки изменяющейся вероятности... На чем основывались эти туманные представления?

При выводе формулы, эквивалентной формуле Релея, Планк прибег к формальному приему. Он заменил интегрирование суммированием. Перешел от непрерывной математической операции к дискретной, как бы заменил подъем по непрерывной кривой движением по ступеням лесенки. Но если непрерывная кривая Релея беспрестанно поднималась в направлении коротких волн, вела к ультрафиолетовой катастрофе, то подъем лесенки можно было ограничить и тем заставить второй член формулы в области коротких волн уступить место первому члену.

Удивительным оказалось то, что вторая постоянная выглядела как произведение некоторой энергии на время. Такое произведение встречается в механике и называется действием. Поэтому Планк решил назвать эту постоянную не элементом вероятности, что могло показаться совсем непонятным, а элементом действия или квантом действия. По-немецки Quantum — количество. Слово происходит от латинского quantum — сколько. А теперь оно означает порцию и входит в определение миниатюрных порций целого ряда квантованных физических величин. Планк обозначил эту постоянную буквой h (аш). Теперь она называется постоянной Планка. Величина ее очень мала, научное значение — колоссально.

Гром за две недели до XX века

14 декабря 1900 года Планк на заседании Берлинского физического общества сделал доклад «К теории закона распределения энергии в нормальном спектре». Никто из слушателей не подозревал, что начинается новая эра в науке. Классическая физика, конечно, не завершилась с концом века. Но за две недели до начала нового, XX века родилась ее дочь — квантовая физика. Даже ее отец не понимал значения совершенного им.

Придав конкретный, физический смысл обеим постоянным, Планк, однако, не мог успокоиться. Их смысл оставался формальным. Нужно было понять, что они означают в действительности. Понять — это значило (тогда, а для многих означает и теперь) объяснить в рамках классических понятий. Вывести из законов классической физики.

Особенно тревожно обстояло дело с квантом действия.

Ведь для действия — произведения энергии на время — не существовало закона сохранения, подобного закону сохранения энергии или закону сохранения импульса. Действие могло, в соответствии с законами механики, изменяться произвольно и даже исчезать. Почему же здесь, выйдя за пределы механики в термодинамику и физику излучения — электродинамику — действие стало изменяться скачками?!

Стремясь к объяснению в духе классических понятий, Планк обрек себя на новые мучения. Все попытки понять суть дела оставались тщетными. Правда, пока рассматривались процессы медленные, протекающие с большими энергиями, все было в порядке. В этих случаях можно считать вторую постоянную бесконечно малой и трактовать процессы как непрерывные. Попросту не замечать ступенек, заменять лесенку плавной кривой. Так поступала классическая физика. Но если энергия была не велика или процессы происходили быстро, то соответствующее действие становилось соизмеримым с величиной таинственной постоянной, и возникали парадоксы типа ультрафиолетовой катастрофы. Несколько лет самого напряженного труда не позволили Планку примирить квант действия с понятиями классической физики.

Воспитание и стремление к традиционному мышлению сделали Планка консервативным человеком. Возникшая ситуация принесла ему много страданий: между квантом действия и классической физикой была пропасть. Но позже он оценил свои результаты оптимистически. В различных публикациях его отношение к кванту не вполне одинаково. В «Научной автобиографии» суть дела выражена одной фразой: «Провал всех попыток перекинуть мост через эту пропасть вскоре не оставил более никаких сомнений в том, что квант действия играет фундаментальную роль в атомной физике, и с его появлением в физической науке наступила новая эпоха, ибо в нем заложено нечто, до того времени неслыханное, что призвано радикально преобразить наше Физическое мышление, построенное на понятиях непрерывности и причинных связей с тех самых пор, как Ньютоном и Лейбницем было создано исчисление бесконечно малых». Опыт, этот высший судья, решил в микромире в пользу второй, квантовой альтернативы. Но понимание микромира в терминах классических понятий так и не возникало. За дело взялись молодые и пошли дальше.

Планк не признает свое отцовство

Первым, после пяти лет всеобщего молчаливого непонимания, сказал свое слово Эйнштейн. Он, подобно богу, сотворившему Еву из ребра Адама, сотворил из кванта действия квант энергии.

Если из формулы Планка вытекало, что электромагнитное поле, взаимодействуя с веществом, передает ему или получает от него энергию порциями, то Эйнштейн установил, что эти порции продолжают существовать в пространстве как своеобразные атомы излучения, кванты света. Впоследствии Комптон окрестил их фотонами.

Такой взгляд позволил Эйнштейну объяснить таинственный фотоэффект, при котором световые волны выбивают из вещества электроны. И делают это не так, как океанская волна,

которая лижет и точит камень постепенно и незаметно. А как пуля, выбивающая из камня осколки.

Опыт говорил, что фиолетовый свет легко выбивал электроны, как ни мала интенсивность света. Но красный свет, даже при огромной интенсивности, мог действовать на металл сколь угодно долго, не выбивая ни одного электрона. Объяснить это свойствами волн невозможно. При помощи квантов света это выглядит просто и наглядно. Кванты красного света несут малые порции энергии. Каждый из них не способен передать электрону энергию, нужную тому для того, чтобы вырваться из металла. А каждый квант летит и падает на металл независимо от других. Практически невероятно, чтобы два кванта одновременно воздействовали на один электрон. Энергия же фиолетового кванта (она почти вдвое больше, чем у красного) достаточна для того, чтобы он мог в одиночку освободить электрон.

Любопытная деталь — зная о работе Планка и ссылаясь на нее, Эйнштейн тем не менее поначалу считал, что Планк идет другим путем. В одной из статей он писал: «Тогда мне показалось, что теория излучения Планка в известном смысле противостоит моей работе». Но длительные размышления привели Эйнштейна к уверенности, что теория Планка неявно использует гипотезу реального существования световых квантов. Эйнштейн дважды упоминает об этом в статье. Но он заблуждался. Планк не только не думал о квантах света как реальных, существующих в пространстве порциях электромагнитной энергии, но в течение многих лет не признавал квантовую теорию света и никогда не считал себя причастным к ее созданию!

Эйнштейн многократно защищал теорию световых квантов, да и саму идею реальности квантовых законов микромира от многих осторожных скептиков, в том числе и от самого Планка. В несовпадении мнений было повинно многое: и разница в возрасте и, что самое главное, различный подход к науке. Планк был консерватором, Эйнштейн — новатором.

Эйнштейн считал, что фундаментом дальнейшего развития теории должны быть две главные закономерности: закон сохранения энергии и связь между Вторым началом термодинамики и законом случая, найденным Больцманом. Именно отсюда вытекает то видоизменение молекулярно-кинетической теории, которое привело к правильному описанию излучения черного тела, к устранению ультрафиолетовой катастрофы и к квантам света.

Но возможности квантового подхода этим не исчерпаны, думал Эйнштейн. Признание реального существования квантов энергии должно открыть пути к разъяснению других парадоксов, возникающих при попытках применения первоначальной молекулярно-кинетической теории к задачам ей не подвластным.

Глубинные клады алмаза

И Эйнштейн со всем пылом берется за дело.

Он начинает с загадки алмаза, не подчиняющегося закону Дюлонга и Пти, так хорошо согласующемуся с представлениями теории о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Вопрос лишь в том, что это за степени свободы. Действительно ли их одинаковое количество у каждой молекулы в твердом теле. Ведь существуют твердые тела, возникающие при отвердении веществ, построенных из многоатомных молекул. А эти молекулы имеют, кроме основных степеней свободы, еще по три на каждый атом. Как они «забывают» об этом при затвердевании?

Эйнштейн понял, что, основываясь на двух главных закономерностях — на законе сохранения энергии и на связи между Вторым началом термодинамики и вероятностью случайных процессов в природе, — можно получить для внутренней энергии твердого тела ту же формулу, к которой Планк пришел в задаче об излучении черного тела.

Тогда возникает удивительная аналогия. При высокой температуре формула Планка переходит в формулу Релея, а полученное Эйнштейном выражение для теплоемкости

твердых тел, очень похожее по своей структуре на формулу Планка, переходит при высоких температурах в закон Дю-лонга и Пти. Все различия между индивидуальными твердыми телами исчезают. Их теплоемкость приближается по величине к утроенной универсальной газовой постоянной. Конечно, температура не должна быть слишком большой, чтобы в веществе не происходили структурные перестройки, например, оно не начинало плавиться или перекристаллизовываться.

Формула предсказывала уменьшение теплоемкости твердых тел по мере уменьшения температуры. У одних уже при комнатных температурах — так ведут себя очень твердые тела: алмаз, бор, кремний. У других позже.

Дело обстоит так, как если бы степени свободы, определяющие теплоемкость, постепенно вымерзая, перестают участвовать в обмене энергией.

Так и происходит на самом деле. Величина кванта энергии, участвующей во внутренних движениях частиц твердого тела, пропорциональна абсолютной температуре тела. И те движения, для возбуждения которых Требуется более энергичный квант, просто не могут быть возбуждены при низких температурах, когда таких квантов практически нет. Поэтому, например, в процессе нагревания твердого тела совсем не участвуют электроны, входящие в состав атомов. Для их возбуждения нужны столь большие температуры, что задолго до их достижения все вещества уже плавятся или испаряются.

Но и в жидком и газообразном виде при обычных температурах внутриатомные электроны тоже не принимают участия в обмене тепловой энергией между молекулами и атомами. Это видно из простых расчетов, основанных На тех же двух главных законах и тоже приводящих к формулам, структура которых аналогична формуле Планка. Для того, чтобы электроны, связанные в атомах, могли участвовать в этих процессах, нужны температуры, превышающие тысячи градусов.

Так Эйнштейн, Планк, а за ними и другие ученые шаг за шагом продвигались вперед в понимании квантовых законов строения материи, разъясняя все парадоксы, «дьявольски» тормозящие развитие науки.

Они искали ключ к пониманию того, как образуются химические соединения, какие температурные условия нужны для тех или иных химических и ядерных реакций, какие элементы наиболее охотно вступают в соединение и какие условия этому благоприятствуют. Осознание механизма поведения и взаимоотношений электронов, протонов, атомов, молекул дает в руки ученых несколько возможностей. Во-первых, возможность целенаправленного управления свойствами веществ. Во-вторых, возможность создавать новые соединения. В-третьих, возможность понять, как было создано все то, что сейчас перед нами. Именно эти знания помогли физикам проникнуть мысленным взором в глубину времени на 15–20 миллиардов лет, когда возникала наша Вселенная. Эти знания помогли представить, как первородное вещество, существовавшее в виде ядерных частиц и электронов, превратилось в звезды, планеты, галактики сегодняшнего мира. И ученые уверены: сегодняшние знания — надежный фундамент для того, чтобы судить о том, что происходило так давно при экзотических условиях в новорожденной Вселенной.

...Великий Гете (в истории ученика чародея) прекрасно показал, что вызвавший дьявола, но не умеющий укротить его, неизбежно попадает в беду. Знания поражают дьявола. Знания — величайший и драгоценнейший продукт человеческой деятельности — побеждают все предрассудки, в том числе и предрассудки, возникающие в самой науке и даже маскирующиеся в одежды законов.

Заблуждение считать, что человек не способен обнаружить и понять вечные законы природы. Человечество уже достигло многого. Еще больше предстоит в будущем. Залогом тому служит один из всеобщих и основополагающих законов — закон неограниченности человеческого познания.

Стремление к умножению знаний ведет к более полному пониманию природы. Человек старается создавать все более совершенные орудия познания — инструменты, приборы, машины. Но ограниченность наших знаний, наши заблуждения, слабости, неполнота теорий

сказываются в замысле, конструкции, исполнении приборов, нужных для экспериментов, и машин, необходимых для хозяйственной деятельности людей. Здесь остро проявляется драматическое столкновение старых и новых идей, точек зрения, предрассудков и пристрастий.

Эйнштейн, размышляя над противоречиями классической и квантовой трактовки природы электромагнитных волн, обратил особое внимание на судьбу таких важнейших инструментов познания макро— и микромиров, как телескопы и микроскопы.

В их работе тесно переплелись и волновые и квантовые свойства света. В их пороках отразились пороки, свойственные однобокому подходу к сущности света. В их достоинствах сказались достоинства более полного подхода, основанного на учете и волновых и квантовых особенностей света.

Попробуем разобраться в этом вопросе — он более всеобъемлющ, чем кажется. Он откроет нам глаза на многое.

СВЕТОВЫЕ ПРЯЛКИ

Гениальные случайности

Человек никогда не был и не сможет побывать ни на одной звезде, не сможет войти в живую клетку, внутрь вируса или атома — и, тем не менее, человечество XXI века разглядывает изображения звезд, планет и клеток, уверенное в истинности увиденного. Эти изображения сработаны микроскопами и телескопами — машинами, но машинами необычными. Они не тянут, не толкают, не поднимают. В них нет обычных для механизмов неутомимых приводов, лязгающих цепных передач, резцов, абразивов — в них работают лучи света. Нужно лишь правильно их направить, собрать в фокус. Лучи неслышно ткнут волшебные и вместе с тем реальные картины жизни окружающего нас мира, воссоздадут облик предметов, столь малых или таких далеких, что без помощи микроскопов или телескопов они навсегда остались бы неведомыми. Эти сотканные нитями света образы так выразительны, словно перед нами сами предметы. Мы не можем взять их в руки, но мы видим их и можем изучать. И в этом разгадка того интереса, который вспыхнул сразу же после того, как неизвестный гений взглянул через капельку стекла на первый подвернувшийся под руку предмет.

Трудно сказать, когда это произошло впервые. Еще двадцать веков назад Евклиду было известно о свете так много, что его знания и поныне служат основой оптики. Возможно, уже тогда искусные умельцы шлифовали чечевицы из стекла и прозрачных камней, чтобы помочь слабеющим глазам стариков. В новое время этому искусству учились заново — церковное мракобесие средневековья свело на нет многие знания и умения древности. Потом кто-то скомбинировал из двух очковых стекол зрительную трубу. Все больше мастеров-ремесленников, соревнуясь между собой, изготавливали такие трубы. Слух об этом дошел до Галилея. И вдохновил его. Галилей сделал свою зрительную трубу и нацелил ее в небо. Все знают, к чему это привело.

Несколько слов о туманной истории микроскопа. Обычно создание этого прибора приписывают Антони Левенгуку. Юный Антони начал с торгового дела, но увлекся шлифованием линз и достиг в этом высокого искусства. Проверяя качество линз, Левенгук случайно взглянул через одну из них на каплю воды и... обнаружил вселенную, кишашую мельчайшими живыми существами. Увлечение шлифованием линз уступило всепоглощающему интересу к жизни странных микросуществ. Так возникла микроскопия, а Левенгук стал первым микробиологом.

Левенгук наблюдал инфузории и бактерии, клетки организма и анатомическое строение насекомых при помощи одиночной линзы. Теперь такую линзу называют увеличительным стеклом или лупой. Он шлифовал свои линзы так искусно и тщательно, что они давали

увеличение до 300 раз, превосходя по качеству изображения все, Что могли дать более сложные зрительные трубы того времени, содержащие комбинации из нескольких линз или зеркал.

Левенгук был очень обстоятельным человеком — многократно проверял свои наблюдения. Они казались такими ошеломляющими и вместе с тем столь достоверными, что Королевское общество в Лондоне, получив от него ряд письменных сообщений, избрало его своим членом. К Левенгуку приезжали ученые и просто любознательные люди, чтобы взглянуть хоть разок на неслыханный заповедник паразитических зверюшек.

Левенгук начал писать в Королевское общество в 1673 году, в возрасте 41 года. Но приступил к своим наблюдениям гораздо раньше. И продолжал их до самой смерти, как и обещал Королевскому обществу, благодаря за свое избрание. Его отчеты поступали в Лондон в течение 50 лет. Все эти годы он не только наблюдал, но и шлифовал новые и новые линзы. Он предпочитал надолго оставлять наиболее интересные предметы в фокусе линзы, потом возвращался к ним, чтобы вновь и вновь повторять наблюдения, уточнять результаты или следить за изменениями объекта. Поэтому он изготовил несколько сот линз. В лучшие из них он смотрел только сам, не подпуская к ним даже именитых посетителей. А среди них были английская королева и русский царь Петр I.

Левенгук не пытался скомбинировать линзы в зрительную трубу. Может быть, просто не догадался это сделать. Он был самоучка, читал мало. Все время уходило на шлифование линз, на наблюдения и на длинные послания в Лондонское королевское общество.

Замечательный оптик Д. С. Рождественский писал с восхищением: «Левенгук достиг того, чего не достигли ученые. Он сам плавил стекло, сам шлифовал, сам полировал, сам монтировал объекты между серебряными и золотыми дисками и, что важнее всего, сам искал и находил объекты наблюдения. Запомним особенно это, потому что в микроскопии творит новое и совершенное тот, кто знает, для чего творит и что ищет».

Вероятно, Левенгук и не смог бы создать микроскоп. Недаром один из творцов оптики Гюйгенс в своей «Диоптрике» писал, что придумать зрительную трубу или сконструировать ее на основе теоретических знаний, без вмешательства случая, мог бы только обладатель сверхчеловеческого ума. Гюйгенс, величайший из оптиков, больше чем кто-либо другой был способен судить о трудности такого шага. Случайности же происходили со многими людьми. Так еще в XVI веке голландский посол в Англии Борель сделал сенсационное сообщение: товарищ его детства оптик Янсен из Миддельбурга изготовил вместе со своим отцом первый микроскоп, состоящий из двух линз. Борель даже называл дату изготовления — 1590 год. Авторы презентовали прибор эрцгерцогу австрийскому, а тот передал его англичанину Дреббелю, у которого посол и видел этот микроскоп. Сам Янсен утверждал, что микроскоп был изобретен его отцом еще раньше.

Сколь достоверна эта история, остается неясным, но когда шлифовальщик очков из того же Миддельбурга Линерегей и некий Мецус подали заявку на выдачу им привилегии на зрительную трубу, то в спор о приоритете вступил и Янсен. Соседи поддержали его притязания, утверждая, что их дети действительно видели через прибор Янсена флюгер на крыше увеличенным, хотя и перевернутым. Как видно, речь шла о зрительной трубе с двумя выпуклыми линзами, которую, как известно, можно применять и в качестве микроскопа.

Первые достоверные сведения о микроскопе относятся к 1609–1610 годам. В это время Галилей после триумфальных астрономических открытий приспособливает свою зрительную трубу для наблюдения мелких предметов.

В 1612 году Галилей изготовил и послал микроскоп в дар польскому королю Сигизмунду. Его микроскоп, как и зрительная труба, содержал выпуклую линзу — объектив, и вогнутую линзу — окуляр. Однако этот вариант оказался не лучшим. Дальнейшее усовершенствование микроскопа пошло по пути, начало которого восходит к Янсону. Судьба микроскопа складывалась менее удачно, чем судьба телескопа. Зрительные трубы для наблюдения удаленных предметов были весьма популярны среди мореплавателей, ими пользовались и полководцы. Великие открытия Галилея привлекли к телескопам всеобщее

внимание. Микроскоп же не сразу нашел себе практическое применение и долго оставался неким курьезом. Лишь открытие Левенгука изменило ситуацию.

Поиски с закрытыми глазами

В свое время изготовлением и теорией действия микроскопов заинтересовался Ломоносов. Он первым использовал их в химических исследованиях. Другой русский ученый академик Эйлер разрабатывал методы расчета объективов для микроскопов, дающих изображение, способное соперничать по качеству с изображением линз Левенгука, тайну изготовления которых подозрительный голландец унес в могилу.

Дело в том, что шлифовальщики стремились придать поверхностям линз идеальную сферическую форму, ибо только сферические поверхности можно было получать при помощи существовавших тогда станков. Впрочем, большинство современных линз тоже имеет сферические поверхности. Однако такие простые линзы применяются только в очках, где кривизна поверхности не велика. Если же радиус поверхности линзы должен быть малым, как в объективе микроскопа, то линзы со сферическими поверхностями дают сильно искаженное изображение. Искажения такого типа называются сферической аберрацией.

Конструкторы оптических приборов поняли, что сферическая аберрация возникает вследствие того, что не все лучи, идущие от удаленного предмета вдоль оси линзы, собираются в общем фокусе. Лучи, проходящие через центральную часть линзы, фокусируются ближе к ней, чем лучи, идущие через внешнюю периферическую часть. В результате точечный источник выглядит на экране не как точка, а как небольшой диск. Поняв причину искажений, конструкторы нашли и меры борьбы с ней: вместо одной линзы научились применять систему надлежащим образом подобранных выпуклых и вогнутых сферических линз. Но такая коррекция не была радикальной, она могла реализоваться только для определенного расстояния системы линз от объекта. Только много позже стало возможным изготовление особых линз со специальной несферической формой поверхности.

В зрительных трубах, телескопах и микроскопах обнаружились искажения и другой природы: контуры изображений размывались радужными окаймлениями. Причина этих искажений тоже была в конце концов понята: лучи разного цвета преломляются по-разному и фокусируются на различных расстояниях от линзы. Так, красный свет преломляется слабее, чем синий, и фокусируется дальше от линзы. Хроматическая аберрация, вздыхают конструкторы... Бороться с ней гораздо труднее, чем со сферической аберрацией. Даже великий Ньютон, который ошибался очень редко, считал, что хроматическая аберрация неустранима. Он исходил из опыта, который привел его к неправильному выводу о том, что все стекла совершенно одинаково преломляют лучи различного цвета. Ньютон ошибался, но он этого не знал.

Правда, еще при жизни Ньютона малоизвестный бельгийский оптик профессор Люкас повторил опыты Ньютона и получил противоположный результат — преломляющая способность различных стекол зависела от цвета световых лучей. Но Ньютон не поверил, а его мнение было законом для остальных физиков.

Несомненно, Эйлер доверял мнению Ньютона, но сам работал не со стеклами, а изучал оптические свойства глаза. И убедился, что глаз является оптическим прибором, не дающим хроматической аберрации — здоровый человек видит контуры предметов без каких-либо радужных каемок. Эйлер объяснил это свойство глаза тем, что глаз содержит несколько преломляющих сред, так что хроматическая аберрация в них компенсируется. На этой основе он предложил изготавливать объективы телескопов из двух линз и слоя воды между ними.

Английский оптик Доллонд ухватился за идею Эйлера, но, зная опыты Ньютона и продолжая опираться на них, пришел к выводу, что преодолеть хроматическую аберрацию можно только при бесконечно большом диаметре линзы. Эйлер стоял на своем. В трактатах 1752 и 1753 годов он вновь возвращается к своему предложению. Неизвестно, чем бы

кончился спор, если бы через год один профессор математики не сообщил, что опыт Ньютона не точен...

Доллонд, узнав об этом, решил испытать все доступные ему сорта стекол и, в результате двухлетних трудов, достиг цели — изготовил ахроматический объектив. Как было принято в то время и зачастую практикуется в наши дни, Доллонд сообщил о своем открытии без указания точных размеров и метода расчета. Поэтому изготовление ахроматических объективов долгое время оставалось монополией семьи Доллондов. Впрочем, впоследствии Доллонд признался, что нужные размеры стекол подбирались для каждого сорта путем многократных проб. Различия в свойствах отдельных партий стекла не позволяли разработать соответствующие расчетные методы.

Эйлер все еще верил результатам Ньютона и вначале считал, что Доллонд не решил задачи построения ахроматического объектива, а просто удачно скомпенсировал сферическую абберацию. Но затем он убедился в правоте Доллонда и разработал метод, позволяющий расчетным путем определять такую форму нескольких линз, чтобы их комбинация одновременно компенсировала сферическую и хроматическую абберации.

Метод Эйлера открыл новую эпоху в создании зрительных труб. Особенно важным он оказался для микроскопов — изображения, даваемые длиннофокусными объективами телескопов, меньше страдали от аббераций, чем получаемые короткофокусными объективами микроскопов. Многие виднейшие математики, среди них Клеро, Даламбер, сам Эйлер, петербургский академик Эпинус, разработавший современный объектив с длинным тубусом — оправой, в которой линзы укреплялись на некотором расстоянии одна от другой, — продолжали совершенствовать методы расчета объективов. Важность таких работ подчеркивалась тем, что Петербургская академия наук назначила за них премию.

Казалось бы, математические методы открывали путь к беспредельному улучшению объективов. Создавалась уверенность, что, улучшая методы расчета и увеличивая точность изготовления линз, можно добиться и идеальной четкости изображения, и беспредельного его увеличения. Впрочем, со временем стало ясно, что качества микроскопа (так же, как и телескопа) далеко не полностью характеризуются достижимым увеличением. Важно не увеличение само по себе, не отношение размера изображения к размеру объекта, а качество изображения и предельно малая величина деталей объекта, которые можно различить в его отображении. А этому мешают не только разного рода абберации, но и другие причины. Искажения могут быть связаны не только с отклонением поверхности линз от строго рассчитанной формы, но и с тем, что изображение зачастую приходится наблюдать не в той плоскости, для которой скорректирована сферическая абберация. Тогда даже при идеальной форме линз прямые линии получаются изогнутыми и квадрат выглядит как подушка с вогнутыми или выпуклыми краями.

Пустые хлопоты

Мысль продолжала работать — родился простейший способ борьбы с различными искажениями: конструкторы придумали диафрагму, отсекающую лучи, идущие через внешние области линз. Они готовы были видеть в диафрагме панацею от всех бед, ждали революции в области усовершенствования оптических приборов. Но цена за такой способ уменьшения искажений превысила первоначальные прикидки — слишком большой оказалась потеря света. Изображение теряло яркость. О главной неприятности, которая вошла в приборы вместе с диафрагмой, ученые еще не знали — о ней догадается впоследствии скромный физик из Иены, но об этом позже.

А пока выяснилось, что увеличение размера изображения, даже после устранения всех искажений, не добавляет в нем различимых деталей, а лишь уменьшает его яркость. Это было пустое, бесполезное увеличение. Оптики продолжали усилия, их влекла одна цель: важно различать мелкие детали в изображении, уловить как можно меньшее расстояние между двумя маленькими точками или тонкими штрихами, когда их еще можно

рассматривать по отдельности. Такую характеристику называли разрешающей способностью — постепенно она стала важнейшей характеристикой оптических приборов. На ее увеличении и сосредоточились чаяния конструкторов.

Создавая оптические приборы, они не могли не учитывать работу человеческого глаза. Ведь глаз — удивительно совершенный прибор. Он поражает своей гибкостью и готовностью приспособливаться к обстоятельствам. Глаз различает отдельно две точки или две узкие линии, отстоящие всего на 3 миллиметра, если даже они удалены от глаза на 10 метров. При этом важны не оба эти расстояния по отдельности, а их сочетание, точнее, угол между прямыми линиями, соединяющими глаз с каждой из точек. Предельное угловое разрешение глаза составляет около одной угловой минуты. Однако это не значит, что, приблизив объект так, чтобы он находился от глаза на расстоянии 10 сантиметров, мы обязательно различим на нем точки, отстоящие друг от друга всего на 0,03 миллиметра. Это удастся только близоруким глазам, способным аккомодироваться (то есть настраиваться) на такое близкое расстояние. Нормальный глаз к этому не способен. Ему может помочь лупа — выпуклая линза, которой пользовался Левенгук. Она позволяет глазу аккомодироваться на очень близкие объекты и использовать полностью свою разрешающую способность.

Микроскоп, зрительная труба с короткофокусным объективом и с соответствующим окуляром, по существу, увеличивает углы, под которыми глаз рассматривает мельчайшие детали. Но когда микроскоп применяется для фотографирования, изображение строит не глаз, а оптическая система микроскопа. И эта оптическая система способна создать, изображение, линейные размеры которого многократно превышают размеры объекта. К этому достоинству прибавляется недостаток, свойственный оптической системе, — сферическая аберрация.

Конструкторы снова оказались перед тупиком. Увеличение может быть сильно изменено при смене окуляра. Но достижимая разрешающая способность не изменяется свойствами окуляра. Практически она полностью зависит от качества объектива...

Возникла парадоксальная ситуация. Теория указывала пути совершенствования объективов, давала формулы, обещающие устранение всех искажений. Технологи утверждали, что они полностью выполняют требования теории. Тщательный контроль подтверждал, что форма поверхности линз и качество стекла выше всех претензий. Но предельно различимыми оставались детали размером около одного микрона, и все усилия ученых и инженеров не приводили к дальнейшему уменьшению различимых деталей. Положение усугублялось тем, что коллективными усилиями оптиков, физиков и математиков теория и метод расчета оптических приборов достигли чрезвычайной ясности. Трудом математиков, среди которых были такие корифеи, как Гаусс и Гамильтон, было доказано, что для проведения расчетов следует основываться на наглядных построениях лучей света, распространяющихся прямолинейно и преломляющихся на границах прозрачных сред. Не было никаких причин сомневаться в справедливости закона преломления лучей света, установленного Снелиусом и Декартом, и закона отражения, известного еще Евклиду. Для устранения хроматической аберрации, конечно, приходилось учитывать зависимость показателя преломления от длины волны света и изучать свойства применяемых стекол. Но этим и ограничивалась необходимость помнить при расчетах оптических приборов о волновой природе света. Так обстояло дело, когда в 1866 году владелец оптической фирмы в Иене Цейс обратился за помощью к 26-летнему физику Аббе.

Как родился «Карл Цейс, Иена»

Имя Цейса сегодня известно сотням миллионов людей, пользующихся фотоаппаратами и биноклями или только мечтающих приобрести оптику фирмы «Карл Цейс, Иена». Но не всем известно, что привело Цейса к славе. Главную роль здесь сыграло то, что делами фирмы занялся именно Аббе. Это очень интересная история.

Карл Цейс родился в 1816 году в семье токаря и после окончания школы четыре года

обучался ремеслу у известного оптика и механика Кернера. Затем он около двух лет стажировался в механических и оптических мастерских Берлина и Вены, Дармштадта и Штутгарта. Возвратившись в 1846 году в Иену, он организовал оптико-механическую мастерскую, выпускавшую лупы и микроскопы. В течение двадцати лет это была рядовая фирма, ничем не отличавшаяся от других. Она не имела особой известности и индивидуального лица. Так продолжалось до тех пор, пока владелец фирмы не понял, что ни искусство мастеров, ни его коммерческие таланты не помогут росту известности и доходов.

Он решил привлечь к делу науку. Конечно, не могло быть и речи об известном ученом — слишком дорого для небольшой фирмы. Выбор пал на скромного молодого физика. Счастливый выбор. Аббе начал пробу пера на самом сложном изделии фирмы — микроскопе. Фирма выпускала несколько типов микроскопов различного назначения, отличающихся главным образом механической конструкцией и внешним видом. Для них было создано несколько семейств объективов и набор окуляров. Оправы и способы крепления делались стандартными, что позволяло применять все объективы и окуляры в произвольных комбинациях для всех типов микроскопов. Среди объективов были и очень сложные, состоящие из многих линз, закрепленных в общей оправе.

Считалось само собой разумеющимся, что качество изображения определяли стекла объективов, а не окуляры, и, тем более, не механическая часть конструкции. И сам Цейс, и его проектировщики и оптики, естественно, уделяли особое внимание качеству полировки линз и точности изготовления оправ. Они знали, что ошибки при изготовлении линз и оправ ухудшают качество изображения. Поэтому точность была божеством, определявшим процветание фирмы. Аббе обратил внимание не на точность. Он отобрал лучшие из каждого типа объективов, чтобы выяснить, чем они отличаются и что мешает их дальнейшему улучшению. Он приобщи к коллекции и лучшие образцы, производимые другими фирмами. И стал сравнивать их между собой, размышлять, прикидывать разные варианты новых узлов. Постепенно открылись удивительные закономерности. Величина области, за пределами которой изображение искажается, и яркость изображения оказались связаны между собой. Чем больше одно, тем меньше другое». Усложняя объектив для подавления радужных каемок и искривления линий, конструктор платил за это потерей яркости изображения. Все, стремившиеся вслед за Эйлером к созданию идеальных объективов, не придавали этому должного значения. Необъяснимой казалась роль оправ. Лучшие объективы различных типов, собранные в одинаковых оправках, превращались в близких родственников не только по виду, но и по способности воспроизводить мелкие детали.

Поразительный факт — предельная разрешающая способность лучших из лучших объективов оказалась близкой и в существенной мере независимой от других характеристик, если наблюдаемый объект находился вблизи середины поля зрения и его рассматривали через подходящий окуляр. При удалении от середины качество изображения всегда ухудшалось. Конечно, по краям разрешение падало из-за всяческих искажений. Но там, где абберации были скомпенсированы, все объективы выглядели близнецами. Теория, опирающаяся на авторитеты лучших оптиков и таких математиков, как Гаусс, занимавшихся теорией оптических расчетов, не позволяла понять, почему так происходит.

Аббе занялся поисками объяснения и обратил внимание на то, что, несомненно, видели многие, но чему никто не придавал значения. При большом увеличении мельчайшая точка изображалась хорошим микроскопическим объективом в виде ряда вложенных одна в другую светлых и темных окружностей. Так же выглядели звезды, наблюдаемые при большом увеличении через телескоп. Двойные звезды выглядели двойной системой таких кружков.

Наблюдательность — замечательное достоинство. Без нее невозможно быть хорошим детективом и разведчиком. А ученый — тоже разведчик, действующий на труднейшем фронте, в вечной битве человечества с предрассудками за овладение знаниями. Но для хорошего разведчика недостаточно обладать хорошим зрением. Недопустимо загружать штаб потоком донесений обо всем увиденном. Увидеть — это еще не все, даже не полдела.

Ведь каждый из нас постоянно что-то видит, пропуская через свое сознание, как песок сквозь решето, массу впечатлений, зачастую не отделяя новых от старых. Впечатления лишь начинаются в глазах, в ушах, в других органах чувств. Формируются же они в мозгу. Мозг хорошего разведчика, детектива, ученого постоянно настроен на решение стоящей перед ним задачи. Каждое вновь возникающее впечатление сравнивается с другими, с запасом сведений, хранящихся в сознании, с фактами, ушедшими в глубины памяти.

Многие видели эти кружки, некоторых они раздражали. Несомненно, Аббе тоже наблюдал их раньше. Трудно представить, что он не видел их в годы учебы. Но тогда его мозг не был специально настроен. Перед ним не стояла задача, требовавшая постоянной сосредоточенности. Теперь же у него возникла точная ассоциация: такие же кружки нарисовал бы на стене в темной комнате луч света, пробравшийся через маленькое отверстие в ставне. Да, такие кружки возникают при дифракции на малых отверстиях. Так не дифракция ли это? — подумал Аббе. Но в объекте, лежащем перед объективом, нет никаких отверстий...

Увидеть — еще не полдела. Увидеть и сопоставить — пожалуй, уже кое-что. Разведчик вправе доложить: видел, предполагаю. Хороший разведчик доложит не только это: увидел, предполагаю, предлагаю. Аббе оказался на высоте. Он вынул линзы из объектива своего микроскопа и вновь взглянул в него. Система светлых и темных колец была видна по-прежнему, хотя и очень тускло. Итак, виноваты не линзы, делает вывод Аббе. Остается один виновник — диафрагма. Кольца, видимые вместо точечных объектов, — результат дифракции света на диафрагме, ограничивающей пучок света, проходящий через объектив. Если же диафрагма отсутствует, ту же роль играет отверстие в оправе объектива.

Может быть, Аббе ошибался? Слишком легко далась ему разгадка. Нет, главное за него сделали эрудиция и интуиция, которые подсказали, где искать ответ. Остальное досказали простые эксперименты. Роль диафрагмы в формировании изображения чрезвычайно наглядно демонстрируется простейшим опытом. Возьмем в качестве объекта набор малых отверстий, расположенных на пересечениях близких равноотстоящих вертикальных и горизонтальных прямых. Осветим их сзади ярким источником. При помощи линзы получим изображение этих отверстий на экране. Это будет, конечно, соответствующая система ярких точек. Теперь поместим вблизи линзы узкую вертикальную щель. Что будет с изображением? Повернем щель горизонтально. А теперь наклонно, под углом 45 градусов. Надеюсь, большинство читателей дало правильный ответ: во всех случаях точки перестали быть видными. Вертикальная щель сформировала на экране набор ярких горизонтальных линий, горизонтальная щель создала набор вертикальных линий, а наклонная щель создала набор наклонных линий, перпендикулярных щели. Заменив щель малым отверстием, мы получим на экране набор точек, окруженных чередующимися темными и светлыми колечками. Впрочем, может случиться и так, что в центре каждой системы колечек будет не светлая, а темная точка. Из этого следует парадоксальный вывод: вид изображения определяется не линзой, а диафрагмой! Аббе, как это только что сделали и мы, убедился в том, что изображение, получаемое на экране, может радикально отличаться от истинного вида объекта. Причем вид изображения зависит от свойств диафрагмы. Геометрическая оптика, доселе служившая надежной основой расчетов всех оптических инструментов, не могла объяснить этого очевидного факта!

Итак, мнения судей разделились. Вся масса предыдущих опытов свидетельствовала о работоспособности телескопов, микроскопов и очков. Совокупность столь многочисленных и достоверных опытов надежно доказывала правильность геометрической лучевой оптики, ее применимость при расчетах оптических инструментов и построениях оптических изображений в таких инструментах. Один опыт, пока один-единственный опыт, противоречил всем остальным: вид изображения определяется диафрагмой.

Какова же роль линз? Что-то было неблагополучно с геометрической оптикой. Речь шла не о недостаточной точности. Физики и конструкторы знали, что геометрическая оптика позволяет построить чрезвычайно точное изображение, если в построении изображения в

реальном приборе, а не на бумаге, участвуют только лучи, идущие под малыми углами к оси прибора. Если не обрезать при помощи диафрагм лучи, идущие более круто к оси, то изображение исказится. Поэтому во всех высококачественных оптических инструментах имеются дополнительные диафрагмы, ограничивающие наклон лучей. В приборах попроще эту роль выполняет оправа объектива.

Речь шла об ином. О совершенно непонятном. Прозорливость Аббе проявилась в том, что он, подобно хорошему детективу, связал неожиданное наблюдение с фактами и обстоятельствами, казалось, очень отдаленными. И, как хороший детектив, потянув за кончик нити, размотал клубок.

Встреча двух эпох

Оказалось, что действие диафрагмы в оптических приборах не сводится к геометрическому ограничению пучков лучей. Диафрагма одновременно вызывает дифракцию света. Но дифракция не может быть объяснена при помощи геометрической оптики. Это сфера волновой оптики. Недаром явления дифракции и интерференции привели к победе волновой теории света над корпускулярной теорией. Даже Ньютону, считавшему свет частицами, корпускулами, было ясно, что ему присуща некая внутренняя периодичность.

Волновая теория приняла эту периодичность за основу. Дифракция и интерференция света потеряли всю свою загадочность. Они объяснялись столь же просто, как дифракция и интерференция звука или волн на поверхности воды — каждый видел, как морские волны огибают препятствия, как гасят или усиливают друг друга.

Древняя геометрическая оптика ни в коей мере не была отвергнута волновой теорией. Просто стало понятным, почему она не в силах справиться с проблемой дифракции и интерференции. Более того, она приобрела в волновой оптике надежный фундамент. Геометрическая оптика оказалась частным случаем, предельным случаем волновой оптики. Простые формулы геометрической оптики, известные каждому школьнику, непринужденно получаются из громоздких формул волновой оптики в тех случаях, когда можно считать длину световой волны бесконечно малой. Но «бесконечно малая» — это математическое понятие. Конечно, математики дают определение этому понятию. Физики подходят к делу более конкретно. Все измерения в физике конкретны. Поэтому требуется указать, по сравнению с чем бесконечно мала, или, попросту, очень мала данная величина. С точки зрения физика, достаточным основанием для перехода от формул волновой оптики к формулам геометрической оптики является условие малости длины волны света по сравнению с самым маленьким отверстием в оптическом инструменте. Но оптик знает и другое. Формулы, полученные при таком жестком условии, остаются применимыми и полезными, когда условие бесконечной малости заменяется не очень определенным условием «достаточной малости». Например, в большинстве случаев «меньше в 3 раза» оказывается достаточным, если не вникать в тонкие детали. Зато в других случаях «меньше в миллион раз» — совершенно недостаточно. Ведь иногда важна мелочь, а она уже исключена из рассмотрения.

Именно так обстоит дело с дифракцией и вопросом о разрешающей способности оптических приборов. Переход к представлениям и формулам геометрической оптики полностью исключает возможность рассмотрения и понимания всего круга этих проблем. Осознав это, Аббе призвал на помощь волновую теорию света. Аббе принадлежал к ученым, стремящимся к созданию приборов и инструментов, а не к установлению принципов и законов. Поэтому он, к сожалению, опубликовал лишь малую часть своих теоретических исследований. Встретившись с загадочным влиянием диафрагмы на получаемое изображение, Аббе счел вопрос об определении разрешающей силы микроскопа второстепенным. Задача состояла в том, чтобы понять, как оптический инструмент формирует видимое изображение, при каких условиях изображение будет, хотя бы в общих

чертах, соответствовать объекту. Прежде чем предпринять трудное путешествие в глубины волновой оптики, Аббе хочет уяснить простейший вопрос. Можно ли, исходя из геометрической оптики, создать реальный прибор, дающий идеальное изображение? Для одиночной линзы геометрическая оптика дает обескураживающий ответ: нет, нельзя. Простейшие формулы, дающие положительный ответ, справедливы только для бесконечно тонкой линзы и для плоского зеркала. Реальная линза имеет толщину. Но даже очень тонкая линза не бесконечно тонка, и учет ее толщины требует более сложных формул. А они показывают, что искажения в одиночной линзе неизбежны. Более или менее приемлемое изображение можно получить только в малой области вблизи оси линзы. Значит, единственный оптический прибор, дающий изображение, точно соответствующее объекту, это плоское зеркало, если оно действительно идеально плоское. И то оно меняет симметрию: правая рука выглядит в зеркале левой, и наоборот.

Не выходя за пределы геометрической оптики, Аббе обнаружил, что наиболее простой оптический инструмент, с наименьшими ошибками преобразующий прямые линии объекта в прямые линии изображения с сохранением углов между ними, должен содержать две тонкие линзы. Не бесконечно тонкие, но тонкие по сравнению с их диаметром. Причем они должны располагаться особым образом, так, чтобы лучи, входящие в первую линзу параллельно друг другу, выходили из второй тоже параллельным пучком. Такая компоновка линз называется телескопической системой. Оси линз и их фокусы должны в ней совпадать.

Мысленный эксперимент Аббе

Установив этот исходный факт, Аббе начал свой поиск. Начал с мысленного эксперимента. Пусть перед объективом телескопической системы, предположил он, располагается объект, представляющий набор мелких отверстий в непрозрачной плоскости. Позади объекта помещается источник света. Каждое отверстие из-за дифракции превращает падающий на него свет в бесконечное число пучков. Объектив сводит эти пучки в маленькие пятнышки в своей фокальной плоскости. Аббе называет это первичной картиной, распределение света в которой всецело определяется объектом. Правда, эта первичная картина в фокальной плоскости совершенно не похожа на объект, не повторяет его контуры, но тем не менее заключает в себе полную информацию о нем.

Далее, рассуждает Аббе, ничто не мешает волнам, собравшимся в первичную картину, распространяться дальше в сторону второй линзы телескопической системы — окуляра. Пройдя через окуляр, все эти волны достигают экрана, расположенного там, где по расчетам геометрической оптики должно возникнуть изображение. И оно возникает — не просто повторяя контуры объекта, но и увеличивая или уменьшая его размеры.

Удивительно просто, лишь немного усложняя схему мысленного опыта, Аббе объясняет все загадки в поведении оптических инструментов, начиная с таинственного воздействия диафрагмы. Если поместить диафрагму в фокальную плоскость объектива, она закроет часть первичной картины. То, что пройдет дальше к окуляру и через него на экран, будет содержать неполную информацию об объекте. А неполная информация и есть искажение. Чем меньше отверстие в диафрагме, тем меньшая информация об объекте проходит через нее к экрану. Если диафрагма очень мала, информация об объекте полностью теряется.

Аббе простым опытом продемонстрировал, как изображение теряет всякое сходство с объектом, как оно оказывается тесно связанным с формой и расположением диафрагмы. Он объяснил и то, почему разрешающая сила оптического прибора уменьшается вместе с диаметром диафрагмы — уменьшение диафрагмы ограничивает наклон лучей, проходящих через прибор. При этом диафрагма отсекает лучи, идущие с большим наклоном, не допускает их к участию в формировании изображения. Такую же роль играет и оправа объектива.

Обобщим то, что не удалось понять ни одному конструктору микроскопов и телескопов, кроме Аббе. Его мысленные эксперименты показали со всей ясностью, как

телескопическая система формирует изображение. Она действует в два этапа. Сперва объектив формирует в своей фокальной плоскости первичную картину. Это еще далеко не изображение. Это лишь зашифрованное сообщение о нем. Затем окуляр отображает это сообщение на экран, где происходит процесс расшифровки, — на экране возникает изображение. Для того чтобы изображение соответствовало объекту, необходимо, чтобы ни на одном этапе информация не искажалась и не терялась. Или хотя бы искажалась мало. Иначе на экране может возникнуть любая картина. Если экрана нет, а изображение рассматривается глазом, то все рассуждение сохраняет силу. Хрусталик как бы входит в состав окуляра, а сетчатка глаза берет на себя роль экрана.

Поняв это, Аббе переходит к объекту, состоящему из двух маленьких отверстий. Каждое из них, взятое отдельно, образует в фокальной плоскости объектива систему чередующихся светлых и темных колец. Каждое представлено в первичной картине отдельной системой колец. Если отверстия в объекте сближаются и расстояние между ними становится меньше половины длины волны, то две системы колец в первичной картинке станут неразличимы. Исчезнет информация о количестве отверстий. Естественно, на экране возникнет изображение одного отверстия. Так объясняется неспособность микроскопа показать раздельно детали объекта, отстоящие меньше чем на половину длины волны.

Казалось бы, туман рассеивается, все становится совершенно ясно: и как формируется изображение, и почему его вид и его четкость так сильно зависят от формы и размера диафрагмы... Тем неожиданнее вопрос, который своей наивностью застал всех врасплох: а в чем же заключается при формировании изображения роль линз? Для чего нужны те самые детали, без которых просто не было микроскопов? Ведь камера-обскура обходится без линз... А что такое камера-обскура? Ящик с малым отверстием в передней стенке. Поставьте перед ним какой-нибудь предмет, осветите его — и на задней стенке ящика возникнет изображение.

Геометрическая оптика поясняет работу камеры-обскуры очень просто. Лучи от каждой точки объекта проходят через отверстие и попадают на заднюю стенку — здесь и возникает изображение. Волновая оптика говорит почти то же самое. Отверстие вырезает из светового поля, порождаемого различными точками объекта, узкие пучки параллельных волн, которые огибают отверстие и превращаются в расходящиеся волны, расширяющиеся внутри ящика наподобие конуса. Налагаясь друг на друга на задней стенке, эти волны формируют изображение.

Нетерпеливый читатель спросит: зачем описывать длинно то, что можно сказать коротко? Действительно, для описания волнового процесса нужно больше слов. Но волновая трактовка позволяет достичь того, что недоступно геометрическому построению — найти самый выгодный размер отверстия. Опыт показывает, что отверстие камеры-обскуры должно быть мало. Увеличение отверстия постепенно уменьшает контрастность изображения, и, наконец, оно становится неразличимым на фоне равномерной засветки. Но чрезмерное уменьшение отверстия уменьшает яркость изображения. Когда диаметр отверстия становится слишком мал, изображение совсем исчезает.

Ясно, что должен существовать оптимальный размер отверстия. Найти его без учета волновой природы света невозможно. Геометрическая оптика здесь бессильна. Волновая же теория позволяет найти его очень просто. Не приводя расчета, скажем только, что для ящика глубиной 10 сантиметров и объекта, удаленного на 10 метров, диаметр отверстия должен составлять около 0,4 миллиметра. При этом камера-обскура дает очень четкое изображение, не уступающее полученным при помощи лучших объективов.

Теперь вернемся к нашему вопросу: почему нужна линза? Геометрическая оптика, позволяя рассчитывать оптические приборы, снабженные сложными многолинзовыми объективами, показывая, как строить ход лучей в оптических приборах, не может дать мало-мальски вразумительного ответа на этот вопрос. Впрочем, до Аббе никто не задумывался над ним. Всем было ясно — линзы нужны, чтобы помогать глазам видеть невидимое. Но зачем и почему — различные вопросы.

Волновая теория отвечает просто. Линза нужна потому, что она позволяет увеличить отверстие по сравнению с оптимальным. Она заставляет волны, проходящие через большое отверстие, складываться в единое четкое и контрастное изображение.

Еще один простой опыт. Прделаем в камере-обскуре второе отверстие. В нее войдет вдвое больше света. Но каждое из отверстий образует отдельную картинку, и они будут налагаться, мешая друг другу. Увеличивая количество отверстий, мы будем все более ухудшать изображение. Если же поставить перед отверстиями или за ними линзу с подходящим фокусным расстоянием, то она изменит направление волн, исходящих из отверстий так, что они сложатся в единое изображение. Имея линзу, можно не только использовать множество отверстий, но просто удалить весь участок стенки, равный размеру линзы. Так работает любой фотоаппарат. Но чем больше его объектив, тем точнее он должен быть сделан, чтобы картинки, складывающиеся из волн, прошедших через каждый участок его поверхности, образовывали единое неискаженное изображение.

Впрочем, волновая теория не запрещает создания камеры-обскуры с большими отверстиями. Просто нужно сделать ящик более длинным. Так, для отверстия диаметром 5 мм нужен ящик длиной 25 м. С ним, конечно, очень неудобно обращаться, а изображения обычных предметов будут очень тусклыми. Однако, направив через его отверстие лучи Солнца, можно наблюдать в конце ящика идеально четкое изображение солнечного диска и рассматривать на нем солнечные пятна. Волновая теория говорит, что, вставив в отверстие этого ящика линзу самого высокого качества с тем же диаметром 5 мм и фокусным расстоянием 25 м, мы не увеличим ни яркости изображения, ни его качества. Оно и без того достигает предела, допускаемого волновой теорией. Но при помощи линзы можно получить яркое изображение в более коротком ящике. Конечно, если линза не совершенна, то при этом теряется качество изображения.

Волновая теория указывает, как укоротить длину прибора, сохранив яркость и качество изображения. Для этого нужно устранить искажения, вызываемые одиночной линзой, применив по крайней мере две линзы. Впрочем, одну из линз или даже обе можно заменить вогнутыми зеркалами. Таков ответ волновой теории. Допросив ее, Аббе четко показал: изображение формирует диафрагма. Линза позволяет пропустить через диафрагму большее количество света и сформировать изображение более ярким и ближе, чем это возможно без линзы. Система линз необходима для того, чтобы осуществить это с минимумом искажений. Разрешающая способность микроскопа, если его увеличение велико, ограничивается только длиной волны света. Увеличить разрешающую способность за счет улучшения линз или конструкции объектива невозможно. Нужно лишь не ухудшать ее при реализации необходимого увеличения.

Воображение и сила мысли скромного физика Аббе принесли фирме «Цейс» славу и ощутимые дивиденды.

Наука и утопия

Теперь нужно возвратиться к телескопу, к тому, что ограничивает его разрешающую способность, понять, при каких условиях можно разглядеть по отдельности две звезды, которые сливаются воедино при использовании бинокля или обычной подзорной трубы?

Волновая теория дает такой ответ. Каждая из звезд образует в фокусе объектива систему светлых и темных колец. Если эти системы колец совпадают или сдвинуты мало, то нельзя уверенно сказать, одной или двумя звездами они образованы. Принято считать, что достаточно уверенно установить это различие можно лишь при условии, если первое светлое кольцо одной картины пересекает светлый центр другой. То же самое будет, если центры выглядят темными (первое темное кольцо совпадает с темным центром). Но радиус первого кольца зависит при данной длине волны только от диаметра объектива. Таким образом, разрешающая сила телескопа пропорциональна отношению диаметра объектива к длине волны света. Волновая теория позволяет вычислить значение множителя

пропорциональности, равное 1,22.

Для того чтобы представить себе, о чем идет речь, вспомним, что разрешающая сила глаза равна примерно 1 дуговой минуте. Оптические свойства глаза несколько лучше, но сетчатка глаза не может их полностью реализовать. Величайший современный телескоп в Зеленчукской обсерватории на Северном Кавказе снабжен зеркалом, диаметр которого 6 метров. Его разрешающая способность составляет 0,02 дуговой секунды, а по количеству собираемого света он превосходит глаз почти в 10 миллионов раз. Если учесть использование фотопластинок, способных накапливать действие света, можно объяснить несравненную возможность этого телескопа к обнаружению чрезвычайно слабых и удаленных светил. Конечно, не только это характеризует возможности телескопа. Первичная картинка, формирующаяся в фокальной плоскости объектива, должна быть при помощи окуляра превращена в изображение, увеличенное настолько, чтобы дифракционные колечки, образуемые каждой звездой, были хорошо различимы. Так будет только в том случае, если весь свет, прошедший через телескоп, попадет в глаз. Если этого нет, то внешние части огромного объектива работают впустую. Их можно попросту закрыть.

Изложение выводов Аббе заняло немного места. А ведь на то, чтобы понять тайну воспроизведения стеклянными линзами страшно удаленных от нас космических объектов и не видимых простым глазом микроскопических предметов, Аббе потратил многие годы. Его сотрудничество с Цейсом продолжалось 22 года. За это время мастерские Цейса превратились в процветающее предприятие, они выпускали оптические приборы, далеко превосходившие все, что могли сделать конкуренты. Аббе стал признанным главой проектировщиков оптических приборов и крупнейшим знатоком теории их действия, профессором теоретической физики в Иенском университете, директором обсерватории.

Однако работу в обсерватории пришлось оставить. В 1888 году умер Карл Цейс. Аббе стал единоличным владельцем фирмы. Управление фирмой отнимало все время и силы. Аббе продолжал совершенствовать производство, сделав его также объектом политического эксперимента. Он был прогрессивным человеком, но не возвысился до понимания научного социализма. Домарксова политическая экономия плюс мечты — вот основа его утопических взглядов о всеобщем братстве людей. Смерть Цейса дала ему возможность претворить свои идеалы в жизнь. После длительных раздумий он в 1896 году передал фирму в собственность уникальной организации, которой дал название «Учреждение Карл Цейс» в память о своем друге и основателе фирмы. Устав «Учреждения Карл Цейс», тщательно разработанный Аббе, превратил фирму в своеобразный производственный кооператив, членами и владельцами которого стали все сотрудники фирмы. К ним должны были присоединяться ее будущие сотрудники независимо от ранга и занимаемой должности. В правление, помимо представителей рабочих и служащих, входили представители Иенского университета и государства. Университет и государство получали часть прибыли.

Аббе задумал новое предприятие как остров социализма в океане капиталистического общества. Фундаментом при этом служил не столько устав, но и теория оптических приборов и передовая технология их производства, непрерывно совершенствовавшиеся под руководством Аббе, а затем силами его учеников. Фирма росла и процветала, постепенно превращаясь в монополию с филиалами в других городах и странах. Впоследствии в «Учреждение Карл Цейс» влились «Иенские стекольные предприятия, Шотт и компания», созданные в 1884 году по инициативе Аббе химиком и специалистом по технологии стекла Шоттом. После смерти Аббе в 1905 году «Учреждение Карл Цейс» постепенно превратилось в предприятие государственно-капиталистического типа и утратило кооперативный дух, заложенный в него Аббе.

Только после создания Германской Демократической Республики «Учреждение Карл Цейс», превратившись в народное предприятие «Карл Цейс, Иена», смогло в условиях развивающегося социалистического общества реализовать и превзойти утопические мечты своего создателя. Дальнейшее развитие получила и теория оптических приборов, созданная Аббе. Она вселила в оптиков надежду на создание идеальных оптических приборов, не

вносящих никаких искажений в воспроизведение объектов. Реально ли это? Слово — за последователями Аббе.

Шаг в будущее

Пожалуй, самой горячей точкой, самой непонятной частью в теории Аббе был вопрос о разрешающей силе телескопа, направленного на две близкие звезды. Этим занялись в первую очередь оптики. В основе теории Аббе заложен учет того, что волны, исходящие от объекта, наблюдаемого в микроскоп, порождаются общим источником. Но каждая точка поверхности, каждая из звезд светит независимо.

Почему теория Аббе не приводит здесь к ошибке? Первым коснулся этой горячей точки молодой русский физик, окончивший Страсбургский университет после того, как он, в связи со студенческими волнениями, был в 1889 году исключен из Новороссийского университета. По окончании университета Л. И. Мандельштам вплоть до начала первой мировой войны, когда он возвратился на родину, работал в Страсбурге. В мае 1911 года появилась его статья «К теории микроскопического изображения Аббе». Статья начинается с изложения идеи Аббе, разработанной им для несамосветящихся объектов. И с замечания о том, что в случае больших предметов можно без затруднений пользоваться геометрической оптикой как для самосветящихся, так и для несамосветящихся объектов. Сам Аббе, как и позднейшие авторы, писал о том, что манипуляции с диафрагмами не должны воздействовать на изображения самосветящихся объектов. Позднее Аббе усомнился в этом, но, по обыкновению, не опубликовал своих соображений.

Мандельштам, как и Аббе, рассматривает простейшую телескопическую систему. Объектом является совокупность параллельных близких тонких проволочек или мелкая металлическая сетка. Проволочки могут быть освещены, а могут быть раскалены так, чтобы светились сами. Аббе при построении своей теории предполагал для упрощения рассуждений и вычислений, что объект освещается плоской световой волной — такая волна возникает, если точечный источник отстоит очень далеко. Тогда небольшой участок сферической волны, попадающий на объект, ничем не отличается от плоской волны. Это идеальный случай.

Мандельштам показал, что результаты Аббе остаются справедливыми и в том случае, если объект освещается одновременно широким конусом волн, приходящих из независимых источников.

Далее все очень просто. Свет, излучаемый раскаленным самосветящимся объектом, не более хаотичен, чем свет, исходящий от объекта, освещаемого широким пучком, приходящим от независимых источников. Значит, расчеты и результаты, полученные Аббе, справедливы и для самосветящихся объектов. Так удалось понять, почему результаты теории Аббе применимы и к случаю, не входящему в рамки первоначально сформулированной им задачи.

Через год Мандельштам возвращается к вопросу о том, для всех ли объектов получаются изображения, похожие на объект, если в оптическом приборе имеется диафрагма. Теория Аббе дает четкий ответ: нет, не для всех. Если первичная картина, возникающая в фокальной плоскости объектива, ограничивается диафрагмой, то в изображении возникают отличия от объекта. Иногда сходство теряется полностью. Примеры нам уже известны. Мандельштам изучает задачу при помощи интегральных уравнений, мощного математического метода, позволяющего выразить качественный ответ Аббе строгими формулами. Мандельштам подтверждает: неискаженное изображение может быть сформировано только от тех объектов, от которых через оптический прибор приходит достаточно полная информация. Если информация приходит искаженной, искажается и изображение. Теперь формулы позволяют с необходимой точностью оценить сходство и различие.

Впоследствии выдающиеся советские оптики В. С. Игнатовский и Д. С.

Рождественский продолжили и уточнили работы Мандельштама. Тем самым они завершили начатое Аббе и еще раньше лордом Релеем развенчание надежд, восходивших к Декарту: в его «Диоптрике» сказано, что тщательное, «идеальное» изготовление линз позволяет увидеть на объекте сколь угодно малые подробности. Нет, дело не ограничивается качеством линз — мысленные, а затем и реальные эксперименты подтвердили это однозначно.

Однако, определив, что ограничивает качество изображений, ученые нашли и путь к устранению его недостатков. В нашей стране, главным образом в Государственном оптическом институте имени С. И. Вавилова, сложилась замечательная школа, далеко продвинувшая методы расчета и конструирования оптических приборов. Это не только уже упомянутый Зеленчукский гигант. Прежде всего, это удивительные телескопы, созданные Д. Д. Максutowым по совершенно новой принципиальной схеме, позволившей создавать на основе сферических зеркал самые короткие, самые совершенные и дешевые телескопы. Советские специалисты создали замечательные фото— и киноаппараты и другие оптические приборы и инструменты, пользующиеся заслуженным признанием во всем мире, где они успешно конкурируют с немецкими, японскими и американскими оптическими изделиями.

Развитие оптических приборов имеет большие перспективы. Рамки астрономии теперь ограничены не возможностями оптиков, а свойствами земной атмосферы и быстрым ростом стоимости крупных телескопов. Первое препятствие устраняется вынесением телескопов за пределы атмосферы. Космическая астрономия овладевает диапазоном миллиметровых радиоволн с одной стороны видимого спектра; коротким ультрафиолетовым, рентгеновским и гамма-излучением с другой его стороны. И те, и другие участки диапазона полностью поглощаются толщей атмосферы и не достигают поверхности Земли. Современная электроника и автоматика позволяют удешевить изготовление крупных телескопов, делать их составными. Уже существуют телескопы, в которых несколько зеркал средних размеров создают общее изображение, не уступающее тому, что получается при помощи зеркал-гигантов.

Так еще в одной области люди обнаружили скрытые резервы в своих знаниях о природе, новые пути изучения окружающего мира. А главное — эти пути обещают привести человека в мир столь малых предметов, которые свет не в состоянии ни обнаружить, ни исследовать. Об этом — наш следующий рассказ.

КВАНТОВЫЙ БИЛЬЯРД

Миражи

Работы Аббе открыли путь к пониманию принципиальных ограничений оптических приборов. Ни конструктивные усовершенствования, ни повышение качества линз, ни самые изощренные их комбинации не способны показать наблюдателю детали, меньшие, чем длина волны видимого света.

Но человек не может не мечтать. Запреты и трудности лишь увеличивают настойчивость и энергию первопроходцев. В случае с микроскопом сама природа подсказывала путь. Нужно перейти от видимого света к более коротким, ультрафиолетовым волнам. Пусть они не видимы глазом, пусть стекло для них не прозрачно. Нужно найти материалы, прозрачные для этих волн, и научиться превращать изображения, не видимые глазом, в видимые.

Так появились различные ультрафиолетовые микроскопы с линзами из специального увиолевого стекла или плавленого кварца и даже совсем без линз — зеркальные микроскопы. В этих микроскопах изображение формируется на фотоэмульсии или на специальных люминесцентных экранах, подобных экранам телевизоров. После обработки на фотоэмульсиях получается обычное видимое изображение. А люминесцентные экраны, светящиеся видимым светом под действием ультрафиолетовых лучей, позволяют

непосредственно следить за поведением микроскопических объектов, освещенных незримыми лучами.

Микроскопы этого типа проникли даже в диапазон, лежащий за пределом ультрафиолетовых волн. Методы, позволившие создать микроскопы ультрафиолетового диапазона, сохранили свою применимость и в диапазоне мягких рентгеновских волн, которые сильно поглощаются и рассеиваются биологическими объектами.

Путь перехода к невидимым электромагнитным волнам, непосредственно следующий из идей Аббе, оказался далеко не единственным. Здесь нельзя не повторить вслед за академиком Рождественским, что в микроскопии творит новое и совершенное тот, кто знает, для чего творит и что ищет. Задачи развития биологических дисциплин предъявляли к микроскопам свои специфические требования. Многие биологические объекты не только очень малы, но и слишком прозрачны. Микроорганизмы и клетки животных и растений обычно окрашены почти столь же слабо, как вода или остальная масса окружающих тканей. Как разглядеть их? Прямой путь — окрашивание — не всегда применим. Имеются случаи неокрашивающихся объектов. Иногда краски убивают живые организмы. Даже в тех случаях, когда окрашивание дает результаты, оно требует лишнего времени.

Но не биологи впервые научились фотографировать бесцветные прозрачные образования. Этого добились конструкторы микроскопов, работа которых сводилась на нет, если в линзах гнездились невидимые дефекты. Такие дефекты нередки в любых стеклах — и в оконных, и в тех, из которых готовят линзы для ответственных оптических приборов.

Наблюдали ли вы когда-нибудь, как солнечный свет, проходя через оконное стекло на белую стену, рисует на ней узоры? Встречаются очень красивые и разнообразные рисунки, в которых переплетаются светлые и темные области. Причина — внутренние неоднородности в стекле. Они могут возникнуть из-за непостоянства состава стекла, если его компоненты плохо перемешаны при варке, или из-за внутренних натяжений, возникших при остывании стекла. При этом прозрачность стекла не нарушается, но возникают неоднородности показателя преломления. Такие неоднородности влияют на распространение света, искривляют ход световых лучей.

Марево, часто искажающее удаленные предметы в пустыне или степи в жаркую погоду, видимая игра воздуха в проеме открытой форточки в морозный день, когда смешиваются потоки теплого и холодного воздуха, — все это родственные явления. Их причина — искривление пути света в средах с изменяющимся показателем преломления — рефракция. Иногда рефракция приводит к эффектным картинам миражей, производящим огромное впечатление на путешественников.

Оптики называют неоднородности в стекле свилью или свиллями, а в быту они известны как «стеклянные сучки». Зафиксирован ряд случаев, когда такие стеклянные сучки были причиной пожаров — они способны действовать как собирающие линзы. Вероятно, многие таинственные загорания вызваны подобными дефектами оконных стекол. Слабая свиль, обычно незаметная в оконных стеклах и витринах, может сделать совершенно непригодным объектив, хотя его поверхность обработана с предельной точностью. Поэтому оптики настойчиво искали метод, позволяющий оценивать однородность стекла перед тем, как начинать трудоемкое изготовление линз.

По-видимому, первым, кто догадался извлечь пользу из того, что свиль не приводит к поглощению света, а лишь изменяет путь его распространения, был Тёплер, оптик, живший в конце прошлого века. Он придумал простейший метод обнаружения свилей в стеклянных заготовках. Для этого нужно взять точечный источник света или попросту любой источник малых размеров, но яркий. По тем временам лучше всего подходила вольтова дуга. Если такой источник есть, дальнейшее зависит от размера объекта, подлежащего исследованию. Когда он велик, например, это большой кусок стекла, то опыт следует проводить в темной комнате с черными стенами. Нужен белый экран и непрозрачная заслонка, которую вдвигают между источником и экраном так, чтобы она своим краем только-только закрыла экран от источника. Как только экран стал темным, заслонку надо закрепить. Итак, экран

темный. Можно начинать исследование куска стекла, который прячется за экраном. Его выдвигают из-за экрана так, чтобы он оказался освещенным. Если свилей нет, экран останется темным. Но если в куске есть свиль, она обязательно нарушит прямолинейность распространения света и часть его попадет на экран. Вот и вся механика опыта. Распределение света на экране позволяет судить о величине неоднородностей и их расположении в массе стекла. Этот простейший метод и его модификации носят имя Тёплера. Иногда его называют методом затемненного поля зрения.

В более сложном исполнении Тёплеровская установка применяется не только для исследования качества стекла, но и для того, чтобы сделать видимыми потоки воздуха в аэродинамических трубах или фотографировать волны, возбужденные в воздухе летящими пулями и снарядами.

Этим же методом воспользовались микроскописты для наблюдения биологических объектов. Прозрачный объект, отдельные части которого различаются только величиной показателя преломления, на Тёплеровской установке «проявится» во всех деталях.

У некоторых читателей, наверное, возник вопрос: а как же справлялся Левенгук в те времена, когда такой установки еще не было? Ведь он как раз и наблюдал бактерии и инфузории, а большинство из них — прозрачные слабоокрашенные объекты. Левенгук ничего не знал о природе света и о процессе возникновения оптического изображения. Как же он видел то, что не должно быть видимо без принятия неведомых ему мер?

Левенгук был прирожденным экспериментатором. Изготовив свой микроскоп, он убедился в том, что хорошие изображения получаются только при очень ярком освещении. Для получения требуемой яркости он направлял на объект свет солнца или свечи, сконцентрированный при помощи вогнутого зеркала. Наилучшее изображение получалось, когда свет падал на объект сзади, под углом около 45° . С зеркалами, изготовленными Левенгуком, как раз и реализовались условия Тёплеровского метода. Описания вида некоторых бактерий и красных кровяных шариков, направленные Левенгуком в Лондонское королевское общество, подтверждают, что он, не подозревая этого, наблюдал рефракционные эффекты. К сожалению, Левенгук хранил методы наблюдения в тайне. Потомкам пришлось повторить все сначала, правда, на совершенно новом уровне.

Вперед с предельной осторожностью

Дальнейший прогресс микроскопии связан с отказом не только от видимого света, но и от использования невидимых ультрафиолетовых и еще более коротких электромагнитных волн. Настала — очередь применения частиц вещества. Но возможность создать микроскоп, работающий при помощи частиц, возникла только в результате длительного развития науки в направлении, не имеющем ничего общего с микроскопом. Она возникла после того, как удалось разобраться в важнейшей проблеме естествознания — проблеме взаимоотношений частиц и волн.

И тут мы должны вернуться из двадцатых годов к началу века, к истокам квантовой науки, к Эйнштейну, которого глубоко тревожило разделение оптических явлений на две категории. Одни из этих явлений легко объяснялись волновой теорией и были совершенно непонятны с квантовой точки зрения. Другие, совершенно непонятные с волновой точки зрения, непринужденно вытекали из квантового подхода. Какая загадка скрывалась под этим противоречием?

В течение десяти лет Эйнштейн настойчиво стремился понять суть дела. Нет, он не пытался построить новую теорию, способную устранить противоречия и все объяснить. Он понимал сложность проблемы, чувствовал, что время окончательных выводов еще не пришло. Эйнштейн был гением, и его гениальность проявилась в том, что он с самого начала принял реальность внутреннего единства волновых и корпускулярных свойств света, понял, что квантовая структура излучения — неизбежное следствие двуединой природы света. И, подобно Ньютону, предоставив будущим исследователям изучение сущности этого единства,

показал, как при помощи фотонов (частиц, или квантов света, введенных им в 1905 году) можно объяснить то, что невозможно объяснить лишь на основе однобоких — волновых или примитивных корпускулярных — представлений.

За период с 1905 по 1916 год ему удалось привлечь кванты для решения загадки теплоемкости и спасения кинетической теории от груза противоречий, внести ясность в тайну магнетизма и в поведение вещества при температуре, близкой к абсолютному нулю. 1916 год стал кульминацией его творчества.

Этот год может сравниться по результативности только с 1905 годом, когда Эйнштейн сделал нечеловеческий рывок: в течение нескольких месяцев подарил науке специальную теорию относительности, теорию квантов света и флуктуационную теорию движения молекул. Теперь он в течение одного года завершил общую теорию относительности, теорию тяготения, потребовавшую для своего создания величайших интеллектуальных усилий. Но мысли о квантовой структуре вещества и излучения не оставляли его.

Продолжая изучать процесс взаимодействия излучения с веществом, Эйнштейн делает два важнейших открытия. Значение первого было впервые оценено лишь через 30 лет молодым советским физиком Фабрикантом, но еще около 10 лет ждало всеобщего признания. После этого оно легло в основу новой области науки — квантовой радиофизики и новой области техники — квантовой электроники, привело к изобретению мазеров и лазеров и их многочисленным применениям. Речь идет об открытии особого механизма взаимосвязи между поглощением и излучением света веществом.

Рассматривая, как атом реагирует на падающий на него свет, Эйнштейн обнаружил, что возможны два родственных, но противоположных процесса. Атом может поглотить порцию энергии, ослабив падающий свет на величину этой порции — на один квант, или отдать падающему свету часть своей внутренней энергии, испустив квант света — фотон, тем самым усилив падающий свет на точно такую же порцию энергии. При этом испущенный фотон будет близнецом тех, которые вызвали его излучение. Близнецом по величине энергии. Пока речь шла только об энергии.

Второе открытие связано с первым и тоже родилось от потребности глубже понять существо квантовых свойств излучения. Эйнштейн снова пристально всматривается в фундамент, на котором покоится квантовая теория, и обращает внимание на то, что все рассуждения были основаны на законе сохранения энергии. Правильно ли это, вернее, достаточно ли обоснованно? Нет, он не ставит под сомнение справедливость этого подхода. Он хочет знать, как изменится теория, если наряду с законом сохранения энергии принять во внимание второй закон сохранения — закон сохранения импульса или, иными словами, закон сохранения количества движения. В механике эти законы глубоко связаны. При соударении упругие шары одновременно обмениваются и энергией и импульсом. Если один бильярдный шар ударяет второй, точно такой же неподвижный шар, то под влиянием отдачи первый шар останавливается, а второй как бы принимает на себя его движение. Если наблюдатель пропустит момент удара, он может вообразить, что первый шар попросту прошел сквозь второй, никак не воздействовав на него.

Эйнштейн ставит вопрос предельно просто: испытывает ли молекула отдачу при поглощении или испускании световой энергии? Ответ можно получить двумя путями — спросив волновую теорию или квантовую.

Волновая теория отвечает: молекула, как точечный источник, излучает совершенно симметричную сферическую волну. Энергия в ней разбегается одинаково во все стороны. Значит, отдачи нет. Точно так же остается неподвижным шар, если в него одновременно с четырех сторон с одинаковой скоростью ударяются четыре одинаковых шара. Они отражаются каждый в свою сторону, обменявшись между собой импульсами через неподвижный шар, который не сдвинется с места.

Эйнштейн уверен — с квантовой точки зрения такого не может быть. Если происходит испускание единичных фотонов, то каждый из них уносит не только энергию, но и импульс. Из закона сохранения следует, что излучающая молекула должна испытать отдачу, как

ружье, из которого вылетела пуля. Неважно, что толкает пулю — пороховые газы, сжатый воздух или пружина. Ружье получает тот же импульс, что и пуля, но он направлен в противоположную сторону.

Какую точку зрения избрать? Чему поверить? От чего оттолкнуться? Эйнштейн не сомневался — законы сохранения отражают основные свойства природы. В 1916 году не было известно ни одного случая, когда законы сохранения нарушались. Сейчас мы знаем, что некоторые из них нарушаются. Например, при определенных процессах в атомах и при некоторых взаимодействиях элементарных частиц нарушается закон сохранения четности — различие между левым и правым при этом приобретает новое, неведомое ранее значение. Но отступления от законов сохранения энергии и импульса представляются нам и сейчас совершенно невероятными.

И тогда, вступая в неведомый квантовый мир, Эйнштейн считал необходимой предельную осторожность. Он опирается только на хорошо установленные и многократно проверенные факты, на закон сохранения энергии, на термодинамику и электродинамику. Он проводит необходимые вычисления и получает бесспорный результат: излучающая молекула или атом испытывают отдачу. Она направлена в сторону, противоположную направлению излучения фотона. Импульс отдачи численно равен энергии, унесенной фотоном, деленной на скорость света.

И еще один вывод: самопроизвольного излучения в виде сферических волн не существует. Излучается всегда фотон, уносящий порцию энергии и определенный импульс. Направление излучения и момент, когда оно происходит, зависит от случая. Совершенно так же, как при распаде радиоактивного атома...

Квантовая теория излучения стала еще более квантовой...

Был ли Эйнштейн удовлетворен? В статьях этого периода чувствуется характерная для него ответственность, высокая степень критицизма к себе. Он констатирует слабость этой теории: она не приводит к более тесному объединению с волновой теорией. Но он не отступает — уверен в надежности выбранного метода. Он объясняет, почему все существовавшие ранее теории взаимодействия излучения с веществом, учитывавшие только обмен энергией, но не обмен импульсами, не противоречили опыту. Дело в том, что для видимого света импульс каждого отдельного фотона очень мал. Его попросту не замечали.

Теперь оставалось ожидать экспериментатора, способного понять намек. Ждать пришлось семь лет.

Предсказания сбываются

Примирившись с двуединой сущностью света, с необходимостью при решении некоторых задач отдавать предпочтение его волновым, а в других случаях квантовым свойствам и идя этим путем решительнее всех, Эйнштейн продолжал настойчиво искать пути к пониманию глубинных свойств излучения. При этом он не пренебрегал ни одной возможностью, подававшей надежду обнаружить, какая из сторон — волновая или квантовая — является более фундаментальной.

Прошло четыре года. Трудных и знаменательных года. Закончилась мировая война. В России прогремели две революции. Ущербная Февральская и Великая Октябрьская. Революция в Германии потерпела поражение и была потоплена в крови. Реакция торжествовала. Голод и разруха способствовали укреплению черных сил. Шовинизм и оголтелый национализм породили первую поросль национал-социализма. Реакционеры в науке травили Эйнштейна. Его теорию относительности объявили большевистской. Работать стало трудно. Все силы уходили на защиту и дальнейшее развитие теории относительности. Лишь одна радостная весть среди охватившего Германию шабаша мракобесия: она пришла в 1919 году из-за Ламанша. Экспедиция Эддингтона обнаружила искривление лучей света, предсказанное теорией относительности! Но это лишь подлило яда в черный костер травли.

И вот в 1921 году среди шести фундаментальных работ, посвященных теории

относительности, короткая заметка: «Об одном эксперименте, касающемся элементарного процесса испускания света». Создатель квантовой теории света объявляет о том, что он нашел способ, как, на основе опыта, сделать выбор между квантовым и волновым подходом. Он сообщает, что приступает к опыту вместе с Гейгером. Идея опыта проста, как почти все придуманное Эйнштейном. Пучок невзаимодействующих атомов летит в пустоте вдоль непрозрачной стенки. Он пролетает мимо узкой прозрачной щели, проделанной в стенке. Позади щели стоит линза. Свет, излучаемый атомом, через щель попадает на линзу. Тут нужно измерить частоту этого света. Волновая теория говорит: эта частота должна быть больше при приближении атома к щели и меньше при его удалении от нее. Таков результат эффекта Доплера. Обычная иллюстрация этого эффекта: повышение тона гудка при приближении паровоза к наблюдателю и понижение при удалении.

Обнаружить этот эффект в случае света не легко. Ожидаемая разность частот очень мала. Но Эйнштейн придумал простой способ преодоления этой трудности. Он решил пропускать исследуемый свет через среду, показатель преломления которой заметно зависит от длины волны света. Он выбирает сероуглерод. В таких средах скорость света зависит от частоты, поэтому волны различных частот пойдут разными путями. Расчет показал, что полуметровый слой сероуглерода позволит легко произвести измерение и отличить «тон» света, излученный атомом до и после щели. Так — выглядит опыт с волновой точки зрения.

С квантовой точки зрения атом излучает не волну, а квант — порцию света, фотон. Энергия фотона, а следовательно, частота излученного света определяется только внутренней структурой атома. Свойства фотона не зависят от того, излучил ли его атом до щели или после пролета мимо нее. Ведь свойства излучающего атома не зависят от его положения относительно щели. Никакой разницы частот фотонов, излученных до и после пролета атома мимо щели, не может быть.

Вот он, решающий опыт, судья, могущий вынести приговор — что есть свет: поток фотонов или волн?

Прошел год, прежде чем физики услышали что-то новое, касающееся задуманного опыта. Эйнштейн публикует две небольшие статьи, чрезвычайно характерные для него. Эйнштейн признает и анализирует допущенные им ошибки. Одна относится к знаменитой работе ленинградского физика Фридмана, сделавшего важнейший вывод из общей теории относительности, вывод, не замеченный автором теории. Сперва Эйнштейн счел эту работу ошибочной, но вскоре убедился в том, что Фридман прав, а ошибся он сам. Об этом Эйнштейн немедленно сообщил в том же журнале, где он критиковал Фридмана.

Вторая из двух статей касается запланированного опыта. Она начинается с краткого изложения идеи опыта и с сообщения о том, что Эрнфест и Лауэ высказали сомнение в его рассуждениях. Лауэ считает, что подробный анализ распространения света в сероуглероде и подобных ему средах, основанный на волновом подходе и учете эффекта Доплера и опирающийся на статью Эйнштейна, приводит к противоречию со вторым началом термодинамики. Значит, анализ, опубликованный Эйнштейном, не полон.

Пройти мимо этого было невозможно. Эрнфест и Лауэ — ближайшие друзья и единомышленники Эйнштейна. Лауэ, кроме того, энергично защищал его от нападок черносотенных реакционеров.

Критика друзей побудила Эйнштейна более подробно изучить волновую трактовку запланированного опыта. Он понял, что ошибся. Предсказание волновой теории при точном математическом анализе совпало с тем, что дает элементарное рассуждение на основе квантовой теории. Так впервые было установлено, что в случаях, когда к анализу явления могут быть применены как волновая, так и квантовая теории, противоречия между ними возникают лишь при недостаточно полном анализе: если не учитываются существенные детали или если вычисления проводятся недостаточно точно. При точном рассмотрении противоречия исчезают. Опыт, проведенный Гейгером и Боте, совпал с тем, что теперь дружно давали обе теории.

Так прошел 1922 год. К этому времени шар, брошенный Эйнштейном в 1916 году,

перелетел через океан и попал в руки профессора Комптона. По склонности он был экспериментатором, но превосходно владел методами теории. Именно он стал крестным отцом кванта света и нарек его фотоном — частицей света. Он понял намек, содержащийся в статье Эйнштейна. Комптон решил подтвердить опытом вывод Эйнштейна о том, что фотон, взаимодействуя с веществом, ведет себя как бильярдный шар, что, столкнувшись с частицей, он обменивается с ней не только энергией, но и импульсом.

В то время физикам были известны только две элементарные частицы вещества: электрон и протон. Фотон еще далеко не всеми считался настоящей частицей. Комптон отчетливо понимал сложность задачи. Если частица входит в состав атома, то квантовая структура самого атома чрезвычайно усложнит обработку опыта. Но работать со свободными частицами невероятно трудно. Дело осложнялось и тем, что импульс фотона видимого света очень мал. Комптон догадался, как одним ударом преодолеть обе трудности. Нужно работать не с фотонами видимого света, а с фотонами рентгеновских лучей. Их импульс в 10 тысяч раз больше.

По сравнению с энергией рентгеновских фотонов, энергия связи внешних электронов атома с его ядром ничтожно мала. Для рентгеновских фотонов электрон, связанный с атомом до соударения, ведет себя при соударении как свободная частица. Все стало просто. Мысленный опыт: поток шариков от игрушечного детского бильярда направляется на большие бильярдные шары. Реальный опыт: поток фотонов бомбардирует электроны, входящие в атомы мишени. Фотоны аналогичны шарикам детского бильярда, электроны — большим шарам, ведь масса фотона обусловлена только его энергией и мала по сравнению с массой электрона. При столкновении выполняются два закона: закон сохранения энергии и закон сохранения импульса. Фотон передает электрону часть своей энергии и часть своего импульса. То же будет при столкновении маленького шарика с большим. Полный обмен возможен, только если шары одинаковы. Значит, столкнувшись с электроном, фотон полетит дальше, изменив направление полета и свою энергию, то есть длину волны. Простой расчет показал, как длина волны изменяется в различных направлениях. Результаты опыта полностью совпали с расчетом. Опыт Комптона оказался таким же решающим подтверждением квантовой природы света, каким наблюдение Эддингтона стало для общей теории относительности.

Существует ли наука ради самой науки?

Примерно через год после выхода научного журнала со статьей Комптона газета «Берлинер Тагесблат» попросила Эйнштейна разъяснить читателям значение этого опыта.

Эйнштейн относился к каждому человеку со столь большим уважением, что не мог ни отказаться, ни ответить сухо или лаконично, как это сделало бы большинство ученых, углубленных в свое дело и ценивших время. Мало кто был способен к столь полному и постоянному самоуглублению, как Эйнштейн. Но свой долг перед человечеством он ставил превыше всего. Он ответил статьей, которая подчеркивает органичную связь между открытиями науки и жизнью общества. Заголовок «Эксперимент Комптона» снабжен подзаголовком «Существует ли наука ради самой науки?»³.

«На этот вопрос, — пишет автор, — с одинаковой решительностью можно ответить и «да», и «нет», смотря по тому, как его понимать. Ученые должны служить науке ради самой науки, не задумываясь о практических результатах. Иначе, потеряв из виду фундаментальные закономерности, наука захирела бы. Она не выполняла бы также и своей великой просветительной миссии, заключающейся в том, чтобы пробуждать и поддерживать в массах стремление к познанию причинных связей. Но эта великая миссия — быть хранительницей одного из самых ценных идеалов человечества — показывает также, до какой степени наука может существовать ради самой науки. Сообщество ученых можно уподобить органу тела всего человечества, который питается его кровью и выделяет жизненно важный гормон, необходимый всем частям этого тела, чтобы оно не погибло. Это

вовсе не значит, что каждый человек должен до пресыщения пичкать себя ученостью и разными научными фактами... Не поможет в решении научных вопросов и широкая гласность. Но каждому мыслящему человеку надо предоставить возможность познакомиться с большими научными проблемами его эпохи, даже если его положение в обществе не позволяет ему посвятить значительную долю своего времени и сил размышлениям над теоретическими проблемами. Только выполняя эту важную задачу, наука приобретает, с точки зрения общества, права на существование.

С этой точки зрения я и хочу рассказать далее о важном эксперименте, касающемся света, или электромагнитного излучения, и выполненном примерно год назад американским физиком Комптоном. Чтобы понять полностью значение эксперимента, мы должны представить себе то чрезвычайно странное положение, в котором находится теперь учение об излучении...»

И Эйнштейн делится сомнениями, которых накопилось так много, что физике пора было бы избавиться от них...

«Теперь, — пишет он, — мы имеем две теории света, обе необходимые и — как приходится признать сегодня — существующие без всякой логической взаимосвязи, несмотря на двадцать лет колоссальных усилий физиков-теоретиков. Квантовая теория света... объяснила так много фактов, что она должна содержать значительную долю истины. Комптон нашел, что рентгеновский свет, рассеянный соответствующими веществами, действительно испытывает изменение частоты, требуемое квантовой (но не волновой) теорией. Положительный результат опыта Комптона показывает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из дискретных корпускул не только в смысле передачи энергии, но и в смысле передачи количества движения».

Так заканчивает свою статью Эйнштейн.

Продолжим наш рассказ о «квантовом бильярде».

Примерно в это время к незримому бильярдному столу склонился еще один гений.

В 1919 году, после демобилизации, военный радиотелеграфист Луи де Бройль возобновил в лаборатории своего брата Мориса исследования фотоэффекта рентгеновских лучей, прерванные войной. Здесь начался его путь на передний фронт науки к тесному соприкосновению с главными проблемами, смущавшими физиков того времени. Именно загадка фотоэффекта привела Эйнштейна к открытию квантов света. Бор связал кванты света со строением атома. Де Бройль дерзко пытался примирить все эти отдельные открытия между собой. Вместе с братом он стремился прояснить зависимость энергии фотоэлектронов от свойств излучения, порывавшего их связь с атомами вещества.

Это была лишь подготовка, начальный класс, из которого ученик разом вознесся к высшим достижениям науки. Он обнаружил две глубокие, поразившие его аналогии. Первая — поведение свободных электронов во многом напоминало поведение рентгеновских лучей... Вторая — общие уравнения механики, уравнения Гамильтона, имели сходство с современными уравнениями волновой оптики... Вот намеки, известные, несомненно, многим. Для того чтобы их правильно понять и истолковать, понадобился, как когда-то было с Аббе, не только талант, но и подходящий настрой мыслей. Такой настрой по воле случая получил де Бройль, изучая фотоэффект и рентгеновские лучи. Ход его мыслей: между электронами и рентгеновскими лучами, несомненно, проявляется глубокая общность. Общность частиц — электронов и волн — рентгеновских лучей. По Эйнштейну свет (а значит, и рентгеновские лучи) — поток отдельных порций энергии, во многом обладающих свойствами частиц... Может быть, правомочно и обратное положение: частицы — электроны обладают какими-то волновыми свойствами?

В 1923 году, в том же году, когда Комптон опубликовал свои замечательные исследования взаимодействия рентгеновских волн с электронами, де Бройль послал в печать серию из трех статей, открывших новую эпоху в науке. Родилась волновая механика, основа огромного здания квантовой физики. В первой статье де Бройль связал движение микрочастицы, до того представавшей перед учеными в виде маленького бильярдного шара,

с распространением особой волны. Свободная частица, летящая прямолинейно и равномерно, как бильярдный шар, бегущий по столу, связана с безграничной плоской волной. Следующий шаг был много труднее. Но он объяснял загадочную устойчивость атома, в котором электроны, вращаясь вокруг ядра, выбирают для себя не произвольные, а определенные орбиты. Чем они выделены — оставалось тайной для всех, включая Бора, обосновавшего устойчивость планетарной модели атома. По де Бройлю, электроны вращаются только по тем орбитам, где укладывается целое число волн, которые электроны могут излучать при боровских перескоках с одной орбиты на другую.

Во второй статье де Бройль попытался сделать то, что Эйнштейн оставил в тылу во время пионерского прорыва к квантам света. Де Бройль набросал теорию интерференции и дифракции света, совместимую с существованием фотонов. Так он перебрал мост между волновой и квантовой сферой. В третьей статье он дал новый вывод формулы Планка и установил глубокое соответствие между движением частиц и связанных с ними волн. То, что содержалось во второй и третьей статьях, не было окончательным ответом. Лишь намеки. Только указание пути.

Здесь не место изложению бурного потока идей и результатов, порожденных этими статьями. Интересно все же отметить, что их автор лишь в следующем году удостоился докторской степени за диссертацию, основанную на развитии этих статей. В течение трех лет идеи де Бройля привлекали лишь теоретиков. В 1927 году Девиссон и Джермер в США, Тартаковский в нашей стране и Дж. П. Томсон в Англии обнаружили дифракцию электронов, прямое подтверждение волновой механики де Бройля.

Нет, наука существует не только ради науки. Аналогия между волнами и частицами дала новую жизнь микроскопам.

Новая жизнь микроскопов

В науке отдельные глубокие прорывы гениальных одиночек чередуются с фронтальными продвижениями, достигаемыми усилиями многих ученых и инженеров. В 1926-27 годах немецкий физик Буш показал, что соленоид — проволочная катушка, обтекаемая электрическим током, — действует на пучок электронов, летящих вдоль ее оси, так же, как линза действует на пучок света. Его ученик Вольф использовал такую катушку и получил на экране, похожем на экран современного телевизора, изображение нагретых скрещенных проволочек. Это было изображение, сформированное не светом, а потоком электронов, испускаемых проволочками! Таков был первый шаг в создании электронного микроскопа.

Тут надо сказать следующее: дело не в том, что конструкторы микроскопов, не решаясь сделать следующий шаг, сидели сложа руки. Нет, они совершенствовали свою область по мере сил и возможностей. Но они шли эволюционным путем, вводя небольшие не принципиальные улучшения. А фундаментальные открытия физики обычно революционизируют все области науки и техники. То же произошло и в области микроскопов после прогресса в квантовой физике. Электроны, эти частицы вещества, смогли взять на себя роль света. И этим раздвинули возможности микроскопов, помогли им в их развитии обойти те принципиальные запреты, которые лежали в природе этих приборов, пока они были чисто оптическими. Частицы заменили волны, и у микроскопов появилось второе дыхание.

Постепенно выяснилось, что электронный микроскоп во многом подобен оптическому. Изображение, получаемое в нем при воздействии электронов на фотографическую эмульсию или на люминесцирующий экран, формируется в соответствии с глубокой оптико-механической аналогией, установленной еще Гамильтоном, работы которого оказали большое стимулирующее действие на де Бройля. Расчеты магнитных, а затем и электростатических линз, вплоть до задачи компенсации их аберраций, как бы повторяли путь, уже пройденный оптиками.

Существенный прогресс был достигнут в разрешающей способности. Принцип, конечно, оставался общим, как и теория Аббе, полностью применимая к электронному микроскопу. Различались длины волн. Длина дебройлевской волны электронов зависит от скорости их движения, а значит, от напряжения, разгоняющего электроны. В большинстве электронных микроскопов дебройлевская длина волны в сотни тысяч раз меньше длины света. Вдохновляющая цифра! Возникла возможность видеть еще более мелкие предметы.

Электронные микроскопы могут использовать все многообразные методы наблюдения и все приспособления, разработанные оптиками. Так, применяя метод затемненного поля зрения, можно различать детали объекта, состоящие всего из десятка атомов. Следующим естественным шагом был переход от электронов к тяжелым частицам — протонам и ионам тяжелых атомов, для которых дебройлевская длина волны еще в тысячи раз меньше.

Для того чтобы полностью избежать aberrаций магнитных и электростатических линз, инженеры пошли по пути предельного упрощения прибора, совершенно отказавшись от применения линз. Так возник электронный и ионный проекторы. Это просто тончайшее острие, расположенное в центре сферы. Оно сделано из вещества, которое исследуется. Электроны и даже ионы вырываются из него очень сильным электрическим полем, приложенным между держателем острия и сферическим экраном. Заряженные частицы летят от острия к экрану по прямым путям и, ударяясь об него, образуют видимое изображение острия. При этом достигается увеличение в несколько миллионов раз — можно видеть структуру кристаллической решетки, образованной атомами, из которых состоит острие. Заметны даже отдельные крупные молекулы, помещенные на поверхность острия.

Возникает законный вопрос: чем же теперь ограничиваются возможности наблюдения частиц микромира? Ответ был найден одним из создателей квантовой физики Гейзенбергом. Его ответ приобрел глубокое принципиальное значение, далеко выходящее за рамки вопроса о разрешающей способности микроскопов, основанных на применении фотонов или заряженных частиц. Об этом речь впереди. Здесь следует подчеркнуть характернейшую черту прогресса: теория и практика постоянно чередуются в лидерстве. То теория, прозревая неведомое явление, дает толчок развитию техники, приборостроения, машиностроения. То наблюдения практиков, эксплуатирующих технику, дают пищу для размышлений теоретикам, толчок к пониманию причин и закономерностей явлений. Эта переключка идет почти в любой сфере деятельности исследователей. Мы же остановились на истории микроскопов потому, что здесь эта переключка особенно рельефна, и потому, что события касаются новейших областей науки о природе — физики. И еще потому, что в этой области особенно контрастно выступает единство целей мысленного эксперимента и реального опыта, их взаимодействие.

Выпад против закона сохранения

Вопрос о совместимости волновых и корпускулярных свойств света продолжал волновать ученых на рубеже второй четверти XX века, волновать еще больше, чем во времена Ньютона. Тогда речь шла лишь об альтернативных возможностях описания единого круга явлений. Теперь сведения о природе расширились и углубились. Стало ясно, что на флангах наших знаний о свете имеются, с одной стороны, факты, непринужденно объясняемые волновой теорией и непонятные с квантовой точки зрения (дифракция, интерференция), и другие факты, легко объяснимые при квантовой трактовке и резко противоречащие волновому подходу (фотоэффект, эффект Комптона). Положение представлялось большинству ученых столь неудовлетворительным, что интеллектуальное напряжение стало почти нестерпимым. Эйнштейн вновь и вновь возвращался к этой задаче, а Бор был готов к самым крайним мерам, лишь бы устранить эти противоречия.

В 1924 году он вместе с Крамерсом и Слэтером заявил, что для примирения волнового распространения света с квантовым характером его испускания и поглощения следует отказаться от закона сохранения энергии в индивидуальных актах испускания и поглощения.

Они предположили, что великий закон выполняется при этом только в среднем, статистически. Возбуждение, вызванное столь радикальной гипотезой, усугублялось авторитетом Бора, уже тогда ставшим очень большим.

Спокойным оставался только Эйнштейн. Он не верил в возможность нарушения закона сохранения энергии и продолжал работать, применять и развивать квантовую теорию, считая, что тайна двойственности со временем будет раскрыта.

Несколько позднее Боте и Гейгер, ранее подтвердившие на опыте совпадение волнового и квантового подхода в опыте, предложенном Эйнштейном, взялись за детальное изучение эффекта Комптона. В результате они экспериментально установили, что закон сохранения энергии справедлив и для индивидуальных актов испускания и поглощения фотонов атомами.

Отчаянная попытка Бора, Крамерса и Слэтера оказалась одним из многих тупиков в лабиринте познания. Но одна идея, высказанная ими в неудачной статье, содержала в себе зерно истины. Волна, приписываемая электронам, каким-то образом определяла вероятность индивидуального акта излучения или поглощения фотонов атомами.

Следующие два года стали переломными. В 1925 году Гейзенберг изобрел квантовую механику, основанную на применении особого математического аппарата. Страдая от сенной лихорадки, он уехал на море, передав своему учителю Борну статью с изложением этих идей. Борн сразу оценил значение работы и немедленно направил ее в печать. Однако, читая статью, он обнаружил, что молодой гений плохо знал достижения математиков! Следуя Мольеру, можно сказать: Гейзенберг не знал, что говорил «прозой», — не подозревал, что пользуется известным исчислением матриц. За время болезни Гейзенберга Борн вместе с Иорданом придали идеям Гейзенберга форму матричной механики. Так возник один из наиболее эффективных методов квантовой физики.

Весной следующего года Шредингер, развивая волновые представления де Бройля, разработал новую форму волновой механики, основанную на привычном для большинства ученых применении дифференциальных уравнений. Когда он пустил ее в дело — для расчетов процессов микромира, — он был потрясен: его подход, основанный на восходящем к Ньютону методе дифференциальных уравнений, и матричный подход Гейзенберга — эти два столь различные подхода — дали совпадающие результаты! Более того, Шредингеру удалось доказать, что это, по существу, одно и то же. Великая книга природы оказалась переведенной на два равноправных математических языка...

Вскоре Борн, принадлежащий к тому же поколению, что и Эйнштейн, и также стремившийся к полной ясности, поднял эстафету, брошенную Бором, Крамерсом и Слэтером при их неудачном выпад против закона сохранения энергии. Не реальная световая волна, а абстрактная волновая функция Шредингера, вернее, квадрат этой функции, определяет вероятность индивидуальных событий в микромире. Это стало путеводной звездой всех, учившихся переводить математический язык квантовой механики на язык реальных событий мира — язык, состоящий из слов, пришедших к нам из обыденной жизни, и очень похожих на них слов и понятий, рожденных классической физикой. Гейзенберг немедленно принял пас своего учителя. Он тоже нашел возможность определять эту вероятность своим методом. Вероятность легко получалась как квадрат соответствующей матрицы... Мост между квантовой физикой и классической был проложен, но оставался еще очень шатким. Когда физики вступили на этот мост, все кружилось и плыло у них перед глазами. Мир казался пьяным...

К осени 1926 года Шредингер, один из создателей квантовой физики, подобно ученику чародея из баллады Гете, впервые испугался разрушительной силы демона, выпущенного им на свободу. Вероятностные закономерности и квантовые скачки между дискретными значениями энергии казались ему несовместимыми с четкой картиной классического мира, управляемого жесткими причинными связями. В сентябре 1926 года по приглашению Бора Шредингер приехал в Копенгаген. Начались изнурительные дискуссии по глубинным основам квантовой механики. Шредингер убеждал: нужно отказаться от представления о

квантовых скачках и от вероятностной трактовки. Бор упорствовал: без этого нельзя понять даже формулу Планка. В конце дискуссии Шредингер в отчаянии воскликнул: «Если мы собираемся сохранить эти проклятые квантовые скачки, то я жалею, что вообще начал дело с квантовой теорией!» Это запомнил третий участник дискуссии — Гейзенберг; запомнил он и ответ Бора: «Зато остальные благодарны вам за это, ведь вы так много сделали для выяснения смысла квантовой теории».

Трудная дискуссия дала толчок титанической работе, главная часть которой легла на плечи Бора и Гейзенберга. Гейзенберг в своих построениях отталкивался от идеи, приведшей когда-то Эйнштейна к теории относительности. Нужно, думал он, как это сделал Эйнштейн, изгнать из теории все, чего не может быть в реальности. Нужно действовать смелее. Ведь Эйнштейн изгнал «абсолютное время», введенное в науку Ньютоном. И это обернулось удачей, сделало формулы более конструктивными.

В мыслях Гейзенберга родился удивительный призрак. Впрочем, он был органичен для того времени напряженных дискуссий о двуединой сущности света. В воздухе все время витало это «либо — либо». Свою находку Гейзенберг назвал принципом неопределенности. Он провозгласил: величины, описывающие реальные состояния, возможные в природе, разбиваются на сопряженные между собой пары. Причем эти пары таковы, что их точное одновременное измерение невозможно. А раз это невозможно, то теория должна включать в себя такую невозможность. Иначе она не может правильно описывать реальный мир. К таким парам относится, например, точное положение частицы и ее точная скорость. На сухом языке математики: координата частицы и ее импульс (произведение массы на скорость).

Гейзенберг иллюстрирует это мысленным экспериментом с микроскопом: мы хотим при помощи микроскопа определить положение частицы и ее скорость. Для этого освещаем ее и фиксируем ее координату при помощи фотона, рассеянного частицей и попавшего в объектив. Чем точнее мы хотим измерить координату, тем меньше должна быть длина волны света. Ведь это определяет разрешающую способность (точность) микроскопа. Но Эйнштейн показал, что фотон, рассеиваясь на частице, передает ей часть своего импульса. Комптон подтвердил это на опыте. Поэтому при измерении координаты частицы мы обязательно изменяем ее импульс. Причем чем точнее мы хотим измерить координату, тем большей должна быть энергия фотона, тем больший импульс получает частица. Но ни величина, ни направление импульса не известны. И эта неопределенность увеличивается вместе с увеличением точности измерения координаты.

Гейзенберг на основе этого мысленного опыта заключил, что произведение из погрешностей измерения этих величин не может быть меньше определенной предельно малой величины. Такой величиной является квант действия, введенный в физику Планком, знаменитая постоянная «аш». Сравнение с ней показывает, относится ли изучаемое явление к макромиру, для описания которого достаточно уравнений Ньютона и Максвелла, или к микромиру, где их не достаточно и нужно прибегать к уравнениям квантовой механики.

Так, после работ Аббе, установившего, как волновая оптика ограничивает разрешающую способность оптических приборов, Гейзенберг показал, что в мире существуют и другие ограничения, имеющие чрезвычайно глубокий характер.

Бор придал принципу неопределенности более общее значение, указав, что все величины, характеризующие динамику процессов микромира, разделяются на пары, дополняющие друг друга при описании этих процессов. К таким парам относятся не только координата и импульс, но также и некоторые другие пары физических величин. Только совокупность таких дополняющих друг друга пар дает полное описание процесса, подобно тому, как для полного описания медали необходимо иметь сведения об обеих ее сторонах. Но эти дополнительные пары, необходимые для полного описания явления, всегда являются сопряженными по Гейзенбергу. Значит, их нельзя одновременно измерить совершенно точно. Поэтому полное описание в микромире не есть абсолютно точное описание. Оно всегда остается приближенным. Приближенным не из-за неумения экспериментатора,

недостатков измерительных приборов или методов измерений. Таково свойство микромира, и оно выражается в вероятностном характере событий и в существовании сопряженных пар характеристик, описывающих эти события.

Вероятностные закономерности всегда и без противоречий переходят в классические закономерности, когда по условиям опыта можно считать постоянную Планка равной нулю. Тогда обращается в нуль и минимальное значение произведения погрешностей измерения сопряженных пар. Принцип неопределенности уходит со сцены, уступая место ошибкам экспериментаторов и их приборов. Так была установлена приемлемая связь между квантовой и классической теориями. Возникла почва для сотрудничества и распределения обязанностей на их границе, определяемой величиной постоянной Планка. Этим в 1927 году было в основном закончено построение фундамента квантовой теории. Физики могли пользоваться ею, не опасаясь впасть в ошибку, и получали все новые результаты, приходя к самым удивительным предсказаниям. Все предсказания сбывались, конечно, если задача была поставлена конкретно и решена без математических ошибок. Квантовая теория продолжала развиваться.

Машина времени

Эйнштейн высоко ценил находку Гейзенберга. В 1931 году он показал, что соотношение неопределенности связывает и измерение таких величин, как энергия и время, хотя время занимает в теории особое место, родственное пространственным координатам. Это был последний конструктивный вклад Эйнштейна в фундамент квантовой физики. Впоследствии он полностью сосредоточился на создании единой теории поля, из которой, по его замыслу, должны были вытекать и квантовая механика, и теория относительности как простые следствия. К сожалению, он не достиг цели. Задача оказалась непосильной для одного человека, сколь ни велики были его гений и настойчивость. Задача не решена и сегодня, хотя теперь появились новые надежды и открылись неожиданные пути.

Эйнштейн все эти годы продолжал стимулировать других к уточнению основ квантовой механики, придумывал новые и новые мысленные эксперименты, которые, по его мнению, должны были подчеркнуть, обострить противоречия квантовой теории. Однако, как и предложенный им опыт, который должен был четко разграничить квантовые и волновые свойства света, опыт, ошибочность которого он вскрыл сам, попытки обнаружить пороки квантовой теории путем мысленных экспериментов приводили к противоположным результатам. Его друзья-оппоненты раз за разом опровергали выводы этих опытов. Подозрительная квантовая теория с каждой попыткой оказывалась все более надежной. И каждый раз очередной мысленный опыт и его анализ вели к дальнейшему развитию науки и лучшему пониманию основ квантовой механики.

В 1952 году споры о трактовке квантовой механики вспыхнули с новой силой. Толчок им дал Шредингер большой статьей «Существуют ли квантовые скачки?». В ней он снова возвращается к знаменитой дискуссии 1927 года, приводя более утонченные и отшлифованные аргументы. Широта, искусная аргументация и литературные достоинства статьи Шредингера надолго запечатлелись и вызвали замешательство в умах тех, кто, не будучи физиком, интересовался общими физическими идеями. Группа исследователей философской науки в Англии решила организовать публичную дискуссию между двумя друзьями, двумя создателями новой физики: Шредингером, отвергавшим квантовые скачки и вероятностное толкование, и Борном, впервые обосновавшим это толкование и сделавшим большой вклад в его развитие.

Дискуссия, к сожалению, не состоялась из-за болезни Шредингера. Но состоялось как бы сражение двух статей, так как Борн ответил на статью Шредингера своей — большой и общедоступной статьей. Статья Борна не потеряла актуальности и сегодня. Ее может прочитать и понять каждый. Борн писал, что в специальных вопросах, в конкретных расчетах все современные физики едины и получают близкие результаты. Расходятся они в

философской трактовке проблем микромира.

Через два года, в выступлении при получении Нобелевской премии, тоже рассчитанном на широкую аудиторию, Борн, в числе других проблем, остановился на толковании квантовой механики. Он понимал, что при обсуждении квантовой механики, ее основ и методов перед широкой аудиторией нужно отталкиваться от того, что было известно ранее. Так он и поступил, углубив и расширив понятие причинности, подробно остановившись на этом, казалось бы, всем привычном понятии. Остановимся на нем и мы — оно имеет глубокое философское значение.

Большинство людей понимает причинность в науке так, как их выучили понимать это в школе учителя, которые, в свою очередь, изучали уравнения Ньютона и Максвелла. Если ты знаешь, в каком состоянии мир находится в данное мгновение, то уравнения могут сообщить о его состоянии в любое другое мгновение в будущем или в прошлом. И люди; знакомые и незнакомые с этими уравнениями, верят, что причинность заключается именно в такой жесткой математической связи будущего с настоящим и прошедшим. Эта уверенность подтверждается и повседневным опытом. Если человек сломал палку, у него окажется два ее куска. Никто не думает о мелких обломках, которые при этом упали на пол. Это детали, мелочи, не влияющие на связь причин и следствий. Но это рассуждение обывателя. У ученого иной подход. «Пустяки? — скажет он об обломках. — Ну, нет. Рассмотрим все подробнее и опиши уравнениями процесс превращения палки в два куска. Эти уравнения учтут и мельчайшие обломки. Случайности бывают только там, где технические трудности препятствуют подробному описанию. В принципе все связано между собой. И в уравнениях будет присутствовать как целая палка (то есть прошлое), так и новые куски и обломки (настоящее)».

Мало кто решается довести эту логику до конца: значит, все предопределено! Уравнения — не что иное, как машина времени, способная показать нам и прошлое, и будущее, если мы способны написать эти уравнения точно и учесть все события, сопутствующие течению времени. Увы, даже Нью. тон в старости, когда его рассудок ослабел в борьбе за истину, сослался на бога. Он отлично понимал, что уравнения работают без помощи бога. Но начальные условия... как узнать начальные условия... не от бога ли они... не бог ли дал толчок миру, предоставив остальное уравнениям?

И вот — простой опыт, мысленный опыт. В стальном желобе, закрытом по концам стальными стенками, лежит бильярдный шар. Толкнем его. Пока его не остановит трение, он будет метаться из конца в конец желоба. Если трение мало, он будет двигаться очень и очень долго.

Школьный учитель, да простят меня школьные учителя, те, которые думают иначе, скажет ученику: сообщите мне положение и скорость шара в первый момент, и я рассчитаю его положение и скорость в любой другой момент после первого толчка. Ученик с полным почтением спросит: как я узнаю момент первого толчка и то, что было в этот момент? И вдумчивый учитель ответит: не знаю. Мои уравнения позволяют рассчитывать положение и скорость шара в прошлом бесконечно далеко. Они будут сообщать свои результаты даже для того времени, когда еще не родился тот слон, из бивня которого выточен шар, и не выплавлена сталь, из которой сделан желоб. Если измерение произведено после того, как движение уже началось, то уравнения не только не могут указать момент первого толчка, но и не способны указать его направления и, даже более того, был ли этот толчок один, или их было несколько.

Спасибо, ответит ученик. Не об этом ли думал Ньютон, ссылаясь на бога? Уравнения имеют дело с идеальными объектами. Переходя к реальному миру, нужно не только вычислять, но и знать, с чего начинать вычисления.

Вопрос не только о бесконечном прошлом. Неясность возникает при рассуждениях о будущем. С какой точностью можно определить положение шара в будущем? Мудрый учитель ответит: это зависит от точности измерения в данный момент. Чем точнее измерение, тем точнее ответ. С этим согласится почти каждый, не забывший, чему его учили.

Но это не всегда так.

Продолжим мысленный опыт. Пусть мы умеем измерять положение шара бесконечно точно: ошибка измерения равна нулю. Пусть погрешность в измерении скорости совсем мала. Обозначим ее маленькой буквой a . Тогда через время t ошибка в вычислении положения шара станет равной a . Эта ошибка увеличивается со временем. Подождем немного, и она станет равной длине желоба. После этого уравнения уже никак не определяют положение шара, ибо ошибка в вычислении превзойдет величину той области пространства, в которой должен оставаться шар по условиям опыта!

Можно измерить скорость вдвое точнее или в десять, сто... миллион раз точнее. Но таким способом мы можем лишь продлить время, в течение которого уравнения способны определять положение шара. Как только это время истечет, погрешность вычислений превзойдет длину желоба. Лишь «бог Ньютона» и «дьявол Максвелла» могут определить скорость бесконечно точно, чтобы уравнения давали разумные ответы бесконечно долго! Так мы убеждаемся в том, что представление о жесткой причинности порождено не критическим пониманием возможностей уравнений. Причинность лишь идол, которому начали поклоняться ньютонианцы, позабыв о предупреждениях Ньютона.

Точно такой же механизм преобразует обратимость уравнений Ньютона в необратимость кинетической теории газов, в необратимость термодинамики и всех реальных механических процессов. Реальный процесс нельзя повернуть вспять на сколь угодно длинных интервалах времени. Мелкие неучитываемые обстоятельства (сродни обломкам палки) заставят процесс, который мы хотим направить в прошлое, свернуть на один из многих возможных путей в будущее.

Причинность, вытекающая из уравнений Ньютона, не есть истинная причинность. Это фетиш, которому поклоняются не понимающие суть реальных процессов. Причинность — скорее осознанная случайность. Ибо наука о случайностях — статистика — позволяет предсказывать реальные события не хуже, а иногда и лучше, чем уравнения Ньютона. Причинность, о которой говорится в философии, гораздо ближе к нашим повседневным представлениям о связи причин и следствий. Нет следствия без причины, но связь между ними может выражаться и через законы случая, через статистику, что составляет основу математического аппарата квантовой физики. Это и есть та руководящая идея, тот плот, который надежно удержит путешественника в плавании по бурным волнам микромира...

...А теперь присоединимся к тем смельчакам, кто строил плот для путешествия по макромиру, в космос. Какие бури сопутствовали им? Какие ориентиры освещали путь? Какие маяки выручали?

Вглядываясь в прошлое, размышляя о поворотах на дороге познания — подчас резких, вызывающих панику и смятение в умах людей, когда со своих привычных мест срывались понятия и верования, словно чемоданы в потерявшей равновесие машине, — мы убеждаемся в том, как не просто изменить укоренившиеся мнения.

И дело не только в естественном нежелании людей менять взгляды и привычки. Каждая перемена словно айсберг, большая часть которого невидима. Новая теория, идея, всякое изменение во взглядах на окружающий мир, кроме очевидных следствий, имеют и те, что сразу не проявляются. Они могут дать знать о себе лишь в далеком будущем, и эти последствия трудно, а иногда невозможно предвидеть.

Так случилось на крутом повороте истории, связанном с открытием Коперника. Долгие века Земля считалась не-подвижной, она была признана центром мира. Все вертелось вокруг нее — Солнце, звезды, вся Вселенная. Церковь видела в привилегированном положении Земли фундамент веры. Ученые — оплот мироздания. Простые люди были убеждены в исключительности своего положения во Вселенной.

Когда Коперник снял тормоз и Земля завертелась и помчалась в свое вечное путешествие по просторам космоса, он нанес удар не только по догматам религии. Земля утратила свою избранность, она стала всего лишь одним из бесчисленного множества космических тел. Для ученых исчезла опора, вокруг которой развивались события мира. Все

без исключения космические тела во Вселенной оказались равноправными — в том смысле, что ни одно из них уже не могло считаться точкой отсчета, той «печкой», от которой можно «танцевать», определяя местоположение землян во Вселенной.

КОРАБЛЬ ГАЛИЛЕЯ

От берегов бумажного мира...

Корабли издревле несли людей в неведомое. К новым землям, к новым знаниям. Аргонавты стремились за золотым руном. В поисках приключений викинги высаживались на загадочных берегах Исландии, Гренландии и даже Нового Света. Колумб, влекомый азартом открытий и желанием найти новые торговые пути, хотел морем пройти в Индию, а наткнулся на незнакомый материк. Корабли Магеллана в жажде географических находок плыли на запад в течение двух лет и обогнули земной шар...

Современному реактивному лайнеру для кругосветного путешествия достаточно одних суток. Космический корабль «Восток» промчал Гагарина вокруг земного шара всего за полтора часа... А сегодня школьники уже делают проекты фотонных и плазменных космических кораблей, которые уйдут в космическое плавание со скоростью, близкой к скорости света...

Корабли — морские, воздушные, космические, — сколько их на счету у человечества! Где-то в славной череде кораблей-первопроходцев затерялся скромный и почти забытый корабль. Он не открывал новых земель, не находил сокровищ, не совершал пиратских набегов, даже не существовал в действительности, но он проложил путь науке. Без него не состоялся бы полет Гагарина, Армстронг не ступил бы на Луну, на поверхности Венеры не оказались бы советские космические лаборатории, которые за завесой непроницаемой облачности фотографировали таинственный венерианский пейзаж. Этому кораблю суждено плыть вечно — не старятся его паруса и корпус, ибо весь он соткан из идей, а движет его воображение. Создав этот корабль, Галилей пригласил на него единомышленников и оппонентов, и с тех пор вахту за вахтой несут на нем поколения учащихся и ученых. И так будет вечно.

На этом корабле человечество совершило рывок в понимании законов движения. В умении прокладывать путь к другим мирам. Именно с этого никогда не плававшего по морям и океанам корабля, словно со стартовой площадки, поднялись в космос спутники и приборы, направляемые к планетам. На этом воображаемом корабле были вычерчены первые путевые карты космических путешествий и осознана гениальная находка Галилея — принцип относительности, который утверждает: законы природы не меняются, если от начальной (принятой за таковую) системы координат — будь то корабль, планета, звезда — перейти к другой, обладающей относительно первой равномерным поступательным движением, движением по инерции.

Этот принцип поясняет, почему те представления о мире, которые человек составил себе, экспериментируя на Земле, универсальны. Законы, которые он вывел, наблюдая мир со своей планеты, отражают общие законы, правящие Вселенной. На них можно положиться потому, что движение Земли в течение коротких интервалов времени очень мало отличается от простого движения по инерции.

Галилей не только провозглашает этот принцип, но дает простые формулы — «преобразования Галилея», — позволяющие ученым увязывать события, происходящие в разных системах, объединенных законом инерции. Но прежде чем понять этот принцип, заложенный в природе, прежде чем построить свой корабль, Галилей долго и упорно изучал всевозможные виды движения: свободное падение, движение по наклонной плоскости,

качение люстр и маятников... Галилея справедливо называют творцом экспериментальной науки. Он первым сделал эксперимент основным орудием познания и научил этому других. Конечно, и до него некоторые ученые дополняли наблюдения природы специально поставленными опытами. Исследовали явления природы не в обычных естественных условиях, а в искусственной «тепличной» обстановке, в которой изучаемое явление развивается по возможности без помех, а сопутствующие процессы не затрудняют или не очень осложняют задачу наблюдателя. Предтечей экспериментальной физики был Стевин, но он не воспитал учеников и из-за стечения обстоятельств и влияния языкового барьера не имел непосредственных последователей. (Он писал свои труды по-фламандски — на языке малого народа, неизвестного большинству людей.) Другие ученые тоже ставили отдельные опыты, но это были лишь грубые пробы, результаты которых казались очевидными.

Галилей был виртуозным экспериментатором и широко применял свое искусство. Он активно воевал со схоластикой и засильем перипатетиков — последователей Аристотеля, похоронивших материалистические корни античной науки и ограничивших свою деятельность словопрениями, бесконечным пережевыванием догматов. Галилей считал важнейшей задачей ученого осмысливание и математическую обработку наблюдений, ибо природа, говорил он, «написана на языке математики, ее буквами служат треугольники, окружности и другие геометрические фигуры, без помощи которых человеку невозможно понять ее речь: без них — напрасное блуждание в темном лабиринте». Переводя результаты опыта на язык математики, Галилей приступает к их математической обработке. И он уверен, что результаты, полученные таким путем, будут подтверждены последующими опытами, «потому что наши рассуждения должны быть о чувственном мире, а не о бумажном мире».

...к миру Чувственному

Таков метод Галилея: опыт, рабочая гипотеза или математическая модель, математическая разработка, а затем опытная проверка результата. Этим методом ученые пользуются поныне и не предполагают заменять его другим.

Толчком мыслям, которые привели Галилея к этому методу, было будничное наблюдение времен его юности. В 1583 году, будучи 19-летним студентом, Галилей обратил внимание на постоянство периода качаний лампад в церкви и на то, что лампы на более длинных подвесах качаются медленнее, чем снабженные короткими подвесами. Он пришел к заключению о том, что маятники одинаковой длины качаются одинаково и что все это несовместимо с учением Аристотеля о падении тел.

Галилей знакомит своих студентов с мысленными опытами: «Я представил себе мысленно два тела, равных по объему и весу, как, например, два кирпича, которые начинают падать с одинаковой высоты в один и тот же момент... Но если представить себе эти кирпичи в процессе падения соединившимися и столкнувшимися вместе, то который же из них... удвоит скорость другого?..» Ответить на этот вопрос не мог ни один из последователей Аристотеля, утверждавшего, что тяжелые тела падают быстрее легких. А ведь два кирпича, согласитесь, тяжелее одного...

Но перипатетика не убеждает ни мысленный опыт, ни реальный. А кроме того, сбрасывая пушечные ядра различной величины с Пизанской башни, экспериментатор не мог с бесспорной надежностью установить различие или совпадение времени их полета. Да и Аристотель не давал способа оценить и предсказать величину ожидаемой разницы. Поэтому малейшую, даже воображаемую разницу моментов приземления перипатетики толковали в свою пользу.

Молодой Галилей понимал, что не в силах человеческих замедлить движение свободно падающих тел, чтобы тем самым облегчить наблюдение и уменьшить погрешности опыта. И он нашел гениальный выход. Он придумал, как смоделировать уменьшенную силу тяжести. Не зная о работах Стевина, он интуитивно, еще не владея законом разложения сил, решил заменить свободное падение тел их скольжением по наклонной плоскости. Ему пришлось

столкнуться с мешающей силой трения, но это его не беспокоило. Галилей изготовил гладкую наклонную плоскость и смазал ее маслом, чтобы уменьшить трение. Оставшимся трением он решил пренебречь. Все тела — большие и малые, легкие и тяжелые — теперь спускались с нее за одинаковое время. Это время зависело от угла наклона. Чем выше подпорка, на которой лежит начало наклонной плоскости, тем быстрее спуск. Галилей установил также, что скорость, приобретаемая телом в конце спуска, не зависит от длины наклонной плоскости, а только от высоты подпорки. И эта скорость одинакова для всех тел, независимо от их веса.

Одинакова скорость, одинаково и время, затрачиваемое любыми телами на спуск по данной наклонной плоскости. Но чем более пологой он делает наклонную плоскость, уменьшая высоту подпорки, тем дольше продолжается спуск, тем удобнее и точнее измерять время движения. Так Галилей сделал то, что казалось невозможным. Он научился управлять величиной силы, с которой тяготение движет тела. Он создал условия, при которых можно очень точно измерять время, затраченное телом на преодоление определенного пути. Измерения показали, что перипатетики не правы. Это время не зависит от веса тела.

Но Галилей не останавливается на этом. Делая наклонную плоскость все более крутой, Галилей приближал условия движения тел по ней к свободному падению. В пределе, когда плоскость вертикальна, она не влияет на падение тела, летящего вдоль нее. Так Галилей не только смоделировал действие различных по величине и постоянных во времени сил, но и впервые осуществил на опыте переход к пределу. Он смог по желанию изменять величину действующей силы от ее наибольшего значения до нуля, когда плоскость становится горизонтальной.

Теперь стала яснее причина того, почему период колебания маятника зависит только от длины подвеса, а не от величины груза. Ведь груз маятника как бы падает по дуге окружности, а ее можно представить совокупностью множества плавно переходящих одна в другую прямых, лежащих на плоскостях, наклон которых постепенно изменяется. И так как скорость, а значит, и время падения не зависят от веса тела, то и период колебания маятника не связан с весом его груза, а только с длиной нити, к которой подвешен груз. Но маятник, практически свободный от трения, позволяет еще проще наблюдать законы движения. Галилей предлагает вбить гвоздь точно под точкой подвеса маятника между нею и грузом и, сохраняя нить натянутой, отклонить груз в сторону, поднимая его до уровня гвоздя. Отпущенный груз будет опускаться до направления отвеса по малой окружности, центр которой совпадает с гвоздем, а затем поднимется на исходную высоту по дуге большой окружности, определяемой полной длиной нити.

Величие этого простого опыта именно в его простоте. Галилей описал его очень подробно. В наших современных терминах этот опыт доказывает закон сохранения энергии в механических явлениях. Потенциальная энергия груза определяется только высотой его подъема и не зависит от формы пути. Потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию движения и обратно. Этот опыт, если измерять достаточно точно, приводит еще к одному следствию: период колебания маятника не однозначно определяется длиной подвеса. Период зависит от размаха колебания. Такой зависимостью можно пренебречь только в том случае, если размахи достаточно малы, что очень важно для тех, кто вслед за Галилеем применял колебания маятника для измерения времени.

Отталкиваясь от подобных опытов, Галилей создал новую главу механики — динамику, науку о движении тел под действием сил, полностью отвергнув фантастические домыслы Аристотеля. Но перипатетики не сдавались. Теперь их атаке подвергалась вся совокупность достижений новой науки, а острие атаки было направлено в наиболее опасный пункт, на пропагандируемое Галилеем учение Коперника о движении Земли.

Мухи, бабочки и другие пассажиры

Возражения были основаны на том, что все механические явления свидетельствуют о

неподвижности Земли. Если бы Земля вращалась, птицы, по убеждению аристотелианцев, отставали бы от ее движения. Тяжелые тела должны падать наклонно, а пушки стрелять на запад дальше, чем на восток. Эти доводы казались неоспоримыми. Здесь в единый союз объединилось множество не достаточно глубоко продуманных мысленных экспериментов и не очень точно поставленных реальных опытов.

На эти возражения Галилей отвечал своим гениальным мысленным экспериментом. Он приглашал оппонентов присоединиться к нему в плавании на воображаемом корабле. Корабле, который, как мы теперь знаем, идет по генеральному пути науки более трехсот лет. И будет идти вечно, лишь несколько уточнив свой курс. Вот что писал Галилей:

«Уединитесь с кем-либо из друзей в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими летающими насекомыми; пусть будет у вас там также большой сосуд с водой и плавающими в нем маленькими рыбками; подвесьте, далее, наверху ведро, из которого вода будет капать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, поставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли попадут в поставленный сосуд... Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту или другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется корабль или стоит неподвижно... И причина согласованности всех этих явлений в том, что движение корабля обще всем находящимся в нем предметам, так же как и воздуху; поэтому-то я и сказал, что вы должны находиться под палубой...»

Приглашая читателя представить себе эти простые и наглядные опыты, Галилей не только отметал возражения против движения Земли, но провозглашал новый принцип, новую основу механики — принцип относительности. Нет такого механического явления или процесса, нельзя придумать ни одного механического опыта, который способен отличить состояние равномерного прямолинейного движения от состояния покоя. С точки зрения механики покой ничем не отличается от равномерного движения, происходящего по прямой. Законы природы тут едины. В каюте можно убедиться, что при задраенных иллюминаторах нет никакой возможности определить, неподвижен корабль или он равномерно движется по поверхности спокойного моря. Своим простым и гениальным мысленным экспериментом Галилей утверждал: движение по инерции само по себе определить невозможно. Для этого всегда необходимо второе тело. О движении корабля Галилея можно судить лишь по отношению к другому кораблю, берегу или звездам. А если нет ни звезд, ни берега, ни другого корабля? Можно ли найти в окружающем мире какие-то надежные ориентиры, абсолюты, какие-то особенности реальной структуры пространства и затем, пользуясь ими как верстовыми столбами, обнаружить свое движение в этом пространстве, не прибегая к наблюдениям положения звезд? Если же и таких особенностей нет, то можно ли создать прибор, способный обнаружить наше движение в пространстве, подобно тому, как лаг, брошенный в море, позволяет определить скорость движения корабля?

О том, как ученые искали возможность ориентироваться с «завязанными» глазами, как много раз возникали сомнения в справедливости принципа относительности Галилея, как потом он был расширен теорией относительности Эйнштейна, как ученые нашли было опору в абсолютном пространстве Ньютона, в эфире, затем отвергли его и совершенно неожиданно, уже в наши дни, обрели эту опору в «новом эфире», который никогда ничем не выдавал себя, но существование которого предчувствовал Эйнштейн, будет рассказано дальше. Будет рассказано и о том, как реальный опыт в кабине самолета, проведенный в 1976 году, готовился вступить в спор с мысленным экспериментом Галилея.

Принцип относительности вошел в науку триста лет назад и затем утвердился в качестве одной из основ механики. Многие реальные опыты подтвердили его

справедливость. Подтвердили его справедливость и последующие эксперименты, в которых ученые пытались в качестве повода для использовать электрические и магнитные явления или старались, как за путеводную нить, ухватиться за лучи света, но... Ни одно открытие в области механики, электродинамики, термодинамики не указало людям явления, которое помогло бы пассажирам корабля Галилея определить свое движение во Вселенной, не видя другого корабля, берега или звезд, не бросая за борт лага, при помощи которого моряки измеряют скорость корабля по отношению к воде.

Корабль Галилея — по сути планета Земля. Вот почему век за веком, год за годом ученые бились и бьются над проблемой ориентации во времени и пространстве. И год за годом, век за веком все более убеждаются в том, что слишком мало знают о таком, казалось бы, тривиальном явлении, как движение.

Принцип относительности Галилея глубочайшим образом связан с движением по инерции. Тело, свободное от действия сил, движется прямолинейно с постоянной скоростью или пребывает в покое, утверждает Галилей вопреки Аристотелю. Движение тел по инерции обязано пространству. Это оно, как выяснил много позже Эйнштейн, придает телам свойство инерции — свойство оставаться неподвижными или продолжать равномерное прямолинейное движение при отсутствии каких бы то ни было сил.

Почему это происходит? — особый вопрос, на выяснение его потрачены века. Понять истинный характер движения, происходящего как бы само по себе, без очевидной первопричины, было нелегкой задачей. Ни великий Аристотель, много размышлявший над проблемой движения, ни его наследники в науке не поняли истины. Почему? Потому что наблюдать движение по инерции в «чистом виде» в обыденной жизни практически невозможно. (Сила тяжести и трение делают движения реальных тел неравномерными. Трение, например, постепенно замедляет движение тела. Сила тяжести придает ускорение всем незакрепленным телам.) Но если нельзя наблюдать явление, остается один выход — представить, вообразить... Этим и занялись следующие пассажиры корабля Галилея.

На судно всходит гений

Величайшим пассажиром, взошедшим на корабль Галилея, был Ньютон. Он воспринял и развил не только научные результаты, но и научный метод Галилея. От опыта к абстракции, к математической модели, к математическому анализу и к контрольным опытам. И если Галилей был первым великим физиком, то Ньютон был не только великим физиком, но и творцом новой математики, позволившей ему решать задачи, недоступные его предшественникам. И в этой многогранности основа мощи и величия Ньютона. Впрочем, может быть, правильнее сказать, что гениальность Ньютона позволила ему стать величайшим физиком и математиком всех времен, создателем классической науки.

Если на великой лестнице познания отметить всего три главные ступени, относящиеся к учению о движении, то это будут те, на которых начертано:

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

«Скорость, однажды сообщенная движущемуся телу, будет строго сохраняться, поскольку устранены внешние причины ускорения или замедления...» (Галилей).

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

Первая фраза отражает заблуждение юной физики, выраженное устами Аристотеля. Вторая — иллюстрирует замечательное прозрение сути движения материальных тел, понимание одного из основных законов природы — закона инерции, сформулированного Галилеем. Третья — подтверждает великий процесс преемственности в науке, закрепления и развития истинных знаний, длящийся иногда на протяжении веков.

Чтобы подняться от Аристотеля к Галилею и Ньютону, человечеству понадобилось более пятнадцати веков и радикальная ломка системы научного мышления. Последователи

Ньютона лишь шлифовали детали его механики и применяли ее в качестве орудия для дальнейшего развития науки и техники. Следующую ступень удалось возвести лишь через два с половиной века. На ней начертано имя Эйнштейна. Он понимает, что закон инерции — основа основ, но далеко не исчерпывает всех событий мира. Эйнштейн исследует вращательные движения, движения, включающие в себя замедления, ускорения, и ищет возможности ориентироваться в более сложном мире, которым правит не только закон инерции, но и другие законы движения.

Однако мы забежали вперед. Нам важны как идеи, так и пути обретения их. И тут мы должны проследить, как Ньютон наследовал Галилею. Ньютон продвинулся далеко по пути Галилея. Он завершил науку о движении, основанную на принципе относительности. Он принял закон инерции в качестве Первого закона динамики. Закон инерции мы заучиваем в школе наизусть, и, наверно, нет ни одного грамотного человека, который бы не помнил его. «Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если только оно не вынуждено изменить его под влиянием действующей силы». Этот закон, который в науке о движении играет фундаментальную роль, нельзя вывести из непосредственного лабораторного опыта. Как мы уже знаем, мешает трение и сила тяготения. Этот закон открыт Галилеем (и сформулирован Ньютоном) в результате наблюдения и опытов с маятниками и наклонной плоскостью, позволяющих учесть мешающие факторы. Дальше этого Галилей не продвинулся, и Ньютон должен был один прокладывать путь через целину. Ему противостояли силы. Силы, действующие на тела. Нарушающие состояние покоя. Изменяющие величину и направление скорости. Силы, придающие ускорение тем телам, на которые они действуют.

Ускорение, этот результат действия сил, можно измерить, не опираясь на другие тела. Ускорение легко обнаружить в каюте корабля Галилея, если ветер подует в его паруса.

Галилей, да и его предшественники, конечно, чувствовали ускорение во время езды в повозках или наблюдая изменение скорости падающих тел. Но никто до Ньютона не ставил вопроса о том, что такое ускорение. Не задумывался над тем, как происходит изменение скорости тела под действием простейшей постоянной силы.

Несомненно, этому мешало отсутствие необходимого математического аппарата, способного описывать изменение измеряемых величин. Ньютон сам создал этот аппарат — метод флюксий. Но этого мало.

Для того чтобы подойти к пониманию природы ускорения и сформулировать Второй закон динамики, связывающий ускорение тела с его массой и действующей на него силой, Ньютон должен был ввести понятие абсолютного пространства, существующего независимо от присутствия в нем материальных тел, ибо ускорение можно почувствовать и измерить без какой-либо связи с внешними телами. Так понятие пространства, ранее считавшееся лишь философской категорией, приобрело физическую реальность, причем его свойства казались не зависящими ни от конфигурации расположенных в нем тел, ни от их масс, ни от их движения. Именно в этом смысле до сих пор понимают слова «абсолютное пространство». В этом же смысле является абсолютным и время в механике Ньютона. Его течение постоянно и одинаково везде и всюду. Оно не зависит от наличия, свойств и движений материальных тел.

Итак, Вторым законом Ньютон связал ускорение тела с его массой и с силой, действующей на него. Третий закон фиксирует равенство действия и противодействия — этот закон дал Ньютону возможность по-новому изучать движения системы, состоящей из двух и более тел. Он впервые объяснил причину отдачи, ощущаемой стрелком или пушкой при выстреле, и множество других явлений, ранее казавшихся непостижимыми. Теперь их можно рассчитывать наперед, и опыт всегда совпадает с расчетом.

Совокупность закона падения тел, полученного Галилеем, и законов движения планет, установленных Кеплером, позволила Ньютону дополнить три закона механики — Четвертым. Законом тяготения. Он и здесь следовал научному методу Галилея, доведя его до высшей строгости. В основе лежали опыты Галилея с движением тел по наклонной плоскости и выведенные из астрономических наблюдений законы Кеплера, описывающие

движение планет. Не видимые движения, ибо они весьма запутаны, а «истинные движения» математической модели, созданной Коперником и исправленной Кеплером. Движения по эллипсам, в одном из фокусов которых расположено Солнце. Математические расчеты привели Ньютона к закону обратных квадратов: сила тяготения убывает так, как возрастает квадрат расстояния. Дальше контрольный расчет — вычисление движения Луны. Проверка... совпадения нет!

Шок!

Иначе нельзя определить состояние Ньютона, уверенного в том, что законы движения получены им правильно, что законы Кеплера точны, а математика, приведшая его к закону обратных квадратов, безупречна. Правда, в вычисления входила одна величина, измеренная не им самим, — радиус Земли. Но его измеряли ученые, достойные доверия.

Считалось, что эта величина измерена точно, и у Ньютона не было ни возможностей, ни достаточных оснований для того, чтобы повторить такие громоздкие измерения заново. Он не публиковал свои результаты шестнадцать лет. Все казалось ему верным и подтверждалось многочисленными опытами. Но один опыт не сходился. Движение Луны грозило разрушить мощное здание новой механики, потопить корабль Галилея. Ибо достаточно одного опыта, чтобы опровергнуть любую теорию. Опыт, в конечном итоге, верховный судья в науке.

История сохранила поразительный факт. Через четыре года после открытия закона тяготения Ньютон опубликовал в Кембридже «Всеобщую географию» Варениуса. Ньютон систематически способствовал изданию книг других авторов, если считал их заслуживающими внимания. В книге Варениуса сообщалось о том, что еще в 1617 году соотечественник автора Снеллиус измерил величину радиуса Земли. Совершенно невероятно, чтобы Ньютона не заинтересовало это сообщение. Правда, результат Снеллиуса значительно отличался от общепринятого во времена Ньютона. Маловероятно и то, что Ньютон не подставил величину, найденную Снеллиусом, в формулу закона тяготения. Сделав это, он должен был получить результат, совпадающий с движением Луны! Почему и чего он ждал еще двенадцать лет?! Остается только догадываться, что произошло на самом деле. Оставил ли Ньютон без внимания давнишнюю работу, дошедшую до него через третьи руки... Или провел вычисления, но не спешил их опубликовать, не имея достаточных оснований, чтобы предпочесть старый результат новому... Общеизвестная научная добросовестность и осторожность Ньютона заставляют нас склоняться к последнему предположению. Факт остается фактом. Ньютон никому не рассказал и нигде не написал о результате Снеллиуса.

Мы не знаем, как Ньютон пытался спасти положение. В течение этих шестнадцати лет он продолжал свои исследования и добился выдающихся результатов в других областях физики. Решение пришло со стороны. В 1682 году на одном из заседаний Королевского общества Ньютон узнал о новом измерении длины земного меридиана, выполненном Пикаром. Ньютон сразу вернулся к своим расчетам 16-летней давности и подставил в них величину радиуса, полученную из измерений Пикара. Все сошлось! Классическая физика праздновала одну из длинного ряда своих побед. Корабль Галилея продолжал плавание. Ньютон и в этот раз не упомянул о Снеллиусе. Теперь бессмысленно пытаться узнать, что было причиной. Забыл ли он историю 12-летней давности? Может быть, он и тогда не обратил внимания на результат Снеллиуса? Или не захотел вводить эмоции в научные результаты? Для него было достаточно бесконечных дискуссий с Гуком.

Перейдем к более существенному. Закон тяготения Ньютона, один из величайших законов, которые на языке математики описывают свойства природы, приводит к большой трудности, ясной уже самому Ньютону. В математическую формулу закона не входит время. Создается впечатление, что сила тяготения распространяется мгновенно. Ньютон отлично сознавал, что это не так. Ему была известна колоссальная величина скорости света, измеренная Рёмером из наблюдений моментов затмения спутников Юпитера. Он понимал, что тяготение может распространяться невообразимо быстро, но не мгновенно. Почему же

это не отразилось в законе тяготения? Мучила Ньютона и другая тайна тяготения: что и как передает его от одного тела к другому? Это оставалось неизвестным. Сравнение с яблоком, вид которого притягивает мальчика (объяснение священника Гассенди), конечно, не соответствовало принципам научного познания, сформулированным Галилеем и уточненным Ньютоном. Да и не много ли этого для яблока...

Ньютон настойчиво думал над загадкой тяготения; но одно дело — обдумывать вопрос самому, другое — отвечать на чужие вопросы... А они сыпались на него — ведь он стал знаменит, его почитали как мудрейшего и всеведущего... Конечно, можно было придумать какую-нибудь временную гипотезу, правдоподобную, наукообразную. Но Ньютон был пуританином в науке, бескомпромиссно честным, он был принципиально против беспочвенных умозаключений. Недаром его гордые слова «гипотез я не измышляю» вошли в историю. Он не боялся сознаться в непонимании причины тяготения. Он писал: «До сих пор я изъяснял небесные явления и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я не указывал причины самого тяготения».

Почему он не указывает эти причины и не объясняет, каким образом осуществляется притяжение? «То, что я называю притяжением, может происходить посредством импульса или какими-либо другими способами, мне неизвестными».

Он признался в бессилии перед великой загадкой природы и предоставил ее решение потомкам. А они безуспешно пытались найти ответ в течение почти трехсот лет.

Еще один великий мореплаватель

Так продолжалось до тех пор, пока на корабль Галилея не взойшел Эйнштейн. Но он не ограничивается опытами в каюте. Он поднимается на палубу и идет по ней со скоростью 3 км/час. Если скорость корабля 30 км/час, то наблюдатель на берегу, измеряя скорость корабля и за дальностью не видя пассажира, но зная, как быстро он ходит, скажет: скорость пассажира относительно берега 33 км/час или 27 км/час, в зависимости от того, движется ли он к носу или к корме. Этот расчет вытекает из принципа относительности Галилея, справедливого для механических явлений. Он основан на законе, сложения и вычитания скоростей.

Потом Эйнштейн сооружает на палубе каюту со стеклянными стенами и измеряет в ней скорость звука. Эта скорость оказывается в каюте одинаковой во всех направлениях и не зависит от движения корабля. Ничего удивительного, ведь звук — это колебания воздуха, чистая механика. Что из того, что наблюдатель, стоящий на берегу, получает другие результаты. Результаты измерений на берегу таковы: скорость звука в каюте больше в направлении движения корабля и меньше в противоположном направлении. Это полностью согласуется с принципом относительности Галилея и вытекает из правила сложения и вычитания скоростей.

Остановимся на этом подробнее, чтобы нам был более ясен дальнейший ход мысленного опыта. В изолированной от внешнего мира каюте воздух не может ни выйти из нее, ни войти вовнутрь. Если человек в этой каюте разговаривает, то с физической точки зрения он создает звуковые волны, которые распространяются в воздухе от его рта со скоростью звука. Они распространяются во все стороны с одинаковой скоростью. И достигают стен каюты одновременно во всех направлениях, если человек стоит в середине каюты. Пассажир в каюте скажет: скорость звука в моей системе координат одинакова во всех направлениях. Наблюдатель на берегу скажет: в моей системе координат — на неподвижном берегу — скорость звука, распространяющегося в движущейся каюте, в различных направлениях не одинакова. Она больше в направлении движения корабля (на величину его скорости) и меньше в противоположном направлении — также на величину скорости корабля. И никто не удивится и не оспорит эти измерения. Каюта изолирована, воздух в ней заперт, источник звука передвигается вместе с кораблем, и как следствие скорость звука различна для пассажира в корабле и наблюдателя на берегу. Тут полная

аналогия с определением скорости пассажира, идущего по палубе.

Эйнштейн, который уверен в универсальности принципа относительности Галилея для всех явлений, а не только для механических, хочет доказать это объективно для оптических явлений. Он ставит вопрос: каков будет результат, если такой же опыт провести, измеряя скорость света?. И Эйнштейн производит мысленный эксперимент, полагая для наглядности, что свет — это волны эфира, подобно тому, как звук — волны в воздухе. Гипотеза эфира не влияет на результат. Она лишь упрощает рассуждения, уменьшает количество необходимых слов, экономит время. Можно «перевести» все рассуждения с «эфирного языка» на «безэфирный» — результаты не изменятся. Но здесь просто нет для этого нужного места. Не посчитал нужным сделать такой перевод и сам Эйнштейн.

Теперь он помещает в центре каюты источник света. Итак, говорит Эйнштейн, имеются две возможности. Первая: каюта увлекает эфир так же, как воздух. Тогда и результат измерения скорости света будет аналогичным опытам со звуком — скорость света зависит от скорости корабля. Наблюдатель на борту корабля и наблюдатель на берегу получают различные результаты для величины скорости света. Их результаты можно сопоставить при помощи формул преобразования Галилея, и опыт совпадет с расчетом.

Вторая возможность: эфир свободно проникает через стенки каюты, они не увлекают эфир в своем движении. Каюта движется сквозь эфир. Как корабль, медленно скользящий по абсолютно гладкому морю, не увлекает частиц воды, а продвигается между ними, так и прозрачные стенки каюты не увлекают эфира, он свободно проникает сквозь стенки. В этом случае наблюдатель, находящийся в каюте, мог бы, не выглядывая наружу, определить, движется корабль или нет: свет достигнет передней стенки каюты позже, чем задней.

Опыт со светом, в случае, когда эфир свободно проникает сквозь стены каюты, не отличался бы от опыта со звуком, если измерять скорость звука не в каюте, а на открытой палубе, где воздух не участвует в движении корабля.

Наблюдатель на палубе скажет: свет бежит к корме быстрее, чем к носу движущегося корабля. Наблюдатель, находящийся на берегу, увидит, что свет коснулся заднего каната, ограждающего палубу, раньше, чем переднего. Но он скажет: скорость света не зависит от движения корабля: различие времени касания лучами света соответствующих канатов определяется тем, что скорость корабля в одном случае прибавляется, а в другом вычитается из скорости света.

Обе возможности, говорит Эйнштейн, неприемлемы. Одна из них заставляет отказаться от предположения о том, что скорость света — постоянная величина, не зависящая от условий опыта и от применяемых приборов. Другая принуждает пренебречь фактом, установленным еще Галилеем: не выходя за пределы каюты, нельзя судить о ее движении. То, что Галилей установил свой принцип для механики, не дает основания для того, чтобы отказаться от него в оптике.

Эйнштейн считает бесспорным, что симметрия явлений природы, заключающаяся в том, что законы природы едины в покоящихся и в движущихся телах, не ограничена механикой. Симметрия справедлива для всех явлений. В этом состоит истинная сущность принципа относительности. Этот принцип шире, чем думал Галилей, для которого механика была основой всех наук.

Эйнштейн убежден: нельзя отказаться ни от принципа относительности, ни от постоянства скорости света. Нужно искать выход из тупика, говорит Эйнштейн, вернее, пишет вместе с другом и сотрудником Инфельдом в замечательной книге «Эволюция физики», вышедшей в 1938 году. В более ранних статьях и брошюрах, посвященных теории относительности, Эйнштейн проводил свои мысленные эксперименты не в каюте корабля, а в купе поезда.

Кредо Эйнштейна — всякая теория должна опираться на реальный опыт — требовало полного доверия к факту постоянства скорости света, неоднократно подтвержденному всеми достоверными экспериментами. Врожденное чувство гармонии убедило Эйнштейна во всеобщей справедливости принципа относительности Галилея, отражающего симметрию

природы — в данном случае симметрию покоя и равномерного прямолинейного движения. В чем же просчет мысленного опыта? Где логика рассуждений уводит от действительности? Может быть, вина лежит на математике? Все ли в порядке в самих формулах сложения и вычитания скоростей? В преобразованиях Галилея?

Кораблекрушения не будет!

Эйнштейн снова и снова обдумывает ситуацию. Переход от одной системы координат к другой осуществляется так, как это принято в классической механике. Это простой, механический закон сложения и вычитания скоростей. Он исходит из существования некоего абсолютного времени, единого для всех наблюдателей, для всех систем отсчета. Он исходит из предположения, что во всех системах координат расстояния между телами имеют одно и то же значение. Из этих двух принципов, которые казались всем вполне естественными, и следуют математические формулы преобразования Галилея... На них сосредоточивает свое внимание Эйнштейн. В них видит узкое место.

Не однажды, не дважды — множество раз ученые перестраивали формулы, рожденные теориями, подчиняясь необходимости увязать формулы с реальностью, с опытными данными. И Эйнштейн вынужден ввести в преобразования Галилея изменения. Он вводит небольшие изменения — о них мы еще будем говорить. Он вводит в них скорость света. Картина меняется словно по волшебству! Все становится на свои места! Теперь скорость света постоянна в обеих системах координат — и на корабле и на берегу! Теперь вновь торжествует принцип относительности Галилея, хотя математические преобразования Галилея изменены. Теперь вновь обретена симметрия явлений природы — на движущихся телах и на телах, пребывающих в покое. Вновь восстановлена гармония. Но... какой ценой? Эйнштейн еще не знает, какую бурю он вызовет, потянув за эту ниточку...

Эйнштейна не удовлетворяет успех от исправления преобразований Галилея, сделавшего их пригодными для анализа событий, связанных с оптическими явлениями, с событиями, где играет роль скорость света. Ему всегда и во всем нужно видеть физическую картину, понять анатомию явления. Эйнштейну было насущно важно понять причины, по которым преобразования Галилея необходимо заменить новыми формулами, выяснить физические следствия этой замены. Луи де Бройль комментирует: «Это Эйнштейн сделал при помощи тонкой и глубокой критики понятий пространства и времени». К этому его привела логика, ведь в формулу скорости входят именно расстояния и время. Затем де Бройль продолжает: «Такая критика была совершенно необходима, поскольку преобразование Лоренца влекло за собой целый ряд следствий, казавшихся тогда совершенно парадоксальными».

Итак, произнесено название «преобразования Лоренца». Да, формулы, найденные Эйнштейном как замена преобразований Галилея, носят наименование преобразований Лоренца. Эйнштейн получил эти усложненные формулы, не зная, что ранее они уже были выведены Лоренцом из других соображений. В то время Эйнштейн работал в должности эксперта третьего класса в Берне в «Бюро духовной собственности», как тогда именовалось Швейцарское патентное бюро. В Берне он не имел возможности ни общаться с физиками, ни пользоваться соответствующей литературой. Он был предоставлен себе, и все, чего он достиг, явилось результатом предельной интеллектуальной сосредоточенности, плодом самостоятельных усилий.

Эйнштейн пришел к этим преобразованиям в 1905 году, исходя из чисто интуитивного, внутреннего убеждения в том, что в природе властвует симметрия и она должна отображаться в уравнениях. Симметрия в природе проявляется, в частности, в принципе относительности и в независимости скорости света от движения наблюдателя. Математика должна отображать эту симметрию. Симметрия жестко ограничивает выбор математических формул, пригодных для описания природы. Эйнштейн был убежден — симметрия требует изменения формул, полученных Галилеем, поэтому он и отважился на эти изменения.

Итак, выход из тупика, найденный Эйнштейном, звучит очень просто: скорость света всегда и везде постоянна; принцип относительности везде и всегда справедлив. Природа устроена так, что скорость света постоянна при всех условиях и никакие тела не могут двигаться со скоростью света или еще большей. В своей автобиографии Эйнштейн рассказывает о мысленном эксперименте, послужившем первым толчком для этой мысли. Школьником он задумался над тем, какой должна предстать световая волна перед наблюдателем, движущимся вдоль нее со скоростью света. Ответ гласил: она должна выглядеть неподвижным электромагнитным полем, величина которого изменяется в пространстве. И вывод школьника: этого не может быть!

Если читатель нуждается в уточнении, если требуется сказать, чего не может быть, то ответ гласит: не может быть движения со скоростью, равной скорости света. Недопустимо даже мысленно считать, что световая волна может при каких-то условиях предстать неподвижным образованием. Природа устроена так, что принцип относительности справедлив не только для механики, что установил Галилей, но и для всех других известных процессов и явлений. Впоследствии пришлось ввести два пояснения: принцип относительности останется справедливым и для всех явлений, которые еще не известны, но могут быть открыты в будущем: элементарные частицы, способные двигаться со скоростью света, не могут двигаться иначе (не могут существовать в покое). Это относится к частицам света — фотонам — и к тем, не имеющим массы покоя частицам, которые, может быть, еще будут открыты.

Казалось бы, замечательный ответ, показавший выход из тупика и открывший новую эру в науке, куплен лишь небольшим усложнением формулы, выражавшей принцип относительности на языке математики. Нет, это не совсем так. Эйнштейн не только изменил формулу. Это был не формальный акт. Эйнштейн проник так глубоко, что пришлось поставить под сомнение исходные принципы, лежащие в основе преобразований Галилея и законов Ньютона. Они исходили из постулата абсолютности времени и пространства для любых наблюдателей — на покоящихся или движущихся телах. Эйнштейн усомнился в неизбежности этого постулата. Пересмотрел основные положения классической механики и в конце концов... отказался от них! Ввел другие исходные постулаты. Основным критерием он принял свое юношеское прозрение — никакая энергия, никакой сигнал не может распространяться со скоростью, большей, чем скорость света в пустоте. Вторым постулатом он счел неизблемость принципа относительности для всех явлений в природе как основы симметрии, гармонии мира, неизбежно отраженной в законах природы. Все это меняло взгляд на устоявшиеся понятия физики. И с этим теперь нужно было жить... Чтобы свести концы с концами, Эйнштейн провел глубокий критический анализ методов измерения времени и расстояний. Эйнштейн много размышлял перед тем, как пришел к расширению принципа относительности и к необходимости пересмотреть многие привычные нам понятия о размерах тел, о постоянстве течения времени во Вселенной, о понятии одновременности событий. Это и легло в основу Специальной теории относительности, о которой будет подробнее рассказано впереди.

ШЕСТЕРЕНКИ ДЛЯ СВЕТА

Что будет, если кит нападет на слона?

Один из добрейших детских писателей возбуждал миллионы умов этим, казалось, бессмысленным вопросом. В самом деле, что может послужить причиной столкновения этих миролюбивых гигантов? И как они могут встретиться, обитая в различных условиях? И вообще, что будет...

Писатель знал, сколь полезно, хотя бы иногда, подумать над подобной ситуацией. Жизнь преподносит и более сложные задачи. Ставит нас в положения не менее невероятные.

Химеры вдруг оживают и требуют ответа, принуждают к принятию решения, от правильности которого зависит очень многое.

Знаменитый вопрос Кассия - что будет, если кит нападет на слона? — модель всеобъемлющей проблемы: кто сильнее, что важнее? В науке этот вопрос возрождается вновь и вновь в дискуссиях о роли опыта, об отношениях опыта и теории.

Опыт — высший судья в науке. С этим теперь никто не спорит. Но как отличить праведного судью от неправедного? Ведь опыты иногда приводят к противоречивым, несовместимым результатам. И как быть, если судья воздерживается от ответа... А бывает и так, как об этом рассказал Пушкин:

Глухой глухого звал к суду судьи глухого;
Глухой кричал: «Моя им сведена корова!»
«Помилуй, — возопил глухой тому в ответ. —
Сей пустошью владел еще покойный дед».
Судья решил: чтоб не было разврата,
Жените молодца, хоть девка виновата.

Судья может судить справедливо, только зная факты и опираясь на закон. Это относится и к науке. Опыт, взятый сам по себе, способен дать лишь очень мало или даже ничего. Для того чтобы правильно поставить опыт и понять его результаты, необходимы правильные законы, правильная теория.

Но как опознать правильные законы в науке, какую теорию следует считать истиной? Ясно, что при этом нельзя просто ссылаться на опыт. Иначе получается порочный круг. Иван кивает на Петра, а Петр кивает на Ивана.

В науке, как и в юриспруденции, законы представляют собой сформулированные человеком и проверенные опытом человечества формулы. В юриспруденции — это словесные выражения объективно сложившихся человеческих отношений. Результат многовекового развития общества. В точных науках — это выраженные на языке математики объективные соотношения, присущие явлениям природы или возникающие в ситуациях, созданных человеком, в научных экспериментах. Только в этом смысле следует понимать известную фразу: законы природы создаются человеком. Человек формулирует их математическим языком, чтобы таким путем понять происходящее в природе.

И в юриспруденции, и в науке законы должны удовлетворять целому ряду логических требований. Вот важнейшие из них:

Непротиворечивость. Один закон не должен противоречить другому. Если два закона противоречивы, один из них должен быть отброшен. Или необходим третий закон, определяющий условия применения первых двух: в таких-то случаях применять первый, а в этих — второй.

Полнота. Все возможные ситуации должны попадать в сферу действия свода законов. Если свод законов полон, то любая возникшая, даже ранее не встречавшаяся, ситуация должна попасть в сферу его действия. Если хотя бы одна новая ситуация оказывается непредусмотренной, то свод законов не полон и нуждается в дополнении. Есть и менее важные требования, но и они существенны, например:

Простота. Желательно, чтобы количество отдельных законов было минимальным, а каждый из них охватывал много соответствующих ситуаций.

Однозначность и ясность. Необходимо, чтобы законы не допускали различных толкований и не требовали дополнительных разъяснений.

Законы науки и учет их следствий требуются для правильной постановки экспериментов и при обработке полученных результатов. Эксперименты необходимы для проверки правильности предсказаний, даваемых теорией. Ибо теория, лишь объясняющая известное, но не позволяющая продвинуться в неведомое, не делающая предсказаний, поддающихся проверке, не может претендовать на то, чтобы заменить ранее существовавшие теории. В этом проявляется диалектика познания: только совокупность опыта и теории составляет настоящую науку.

Мы знаем, что будет, если хотя бы один новый опыт противоречит теории, то есть противоречит огромной совокупности прежних опытов, из которых выросла эта теория. Речь идет, конечно, только о правильном опыте, об опыте, поставленном и обработанном без ошибок и, желательно, повторенном независимыми исследователями. Такой опыт не может отвергнуть результатов других столь же тщательно поставленных и обработанных опытов. Он является лишь сигналом о том, что теория не полна. Что она должна быть дополнена или переработана.

Но что будет, если внезапно обнаружится противоречие между двумя фундаментальными теориями? Общеизвестными теориями, относящимися к двум не связанным между собой областям науки и до того непринужденно объяснявшими огромное количество опытных данных.

Слон вышел на отмель, около которой плещется кит!

Победы королевы Механики

Великая древняя наука механика... Вместе с арифметикой и геометрией она пришла к нам из тьмы веков. Это не просто красивая метафора. Возраст «Механики» Аристотеля перевалил за двадцать веков. А еще четыре века назад она безраздельно властвовала в умах образованных людей и, несмотря на множество своих ошибок, служила фундаментом великолепных зданий и мостов, акведуков и прекрасных скульптур. Надежным фундаментом, ибо во всех подобных случаях достаточно законов статики, относящихся к условиям равновесия сил, действующих на неподвижные тела. Главные же ошибки «Механики» Аристотеля начинаются там, где он пытается объяснить процесс движения.

Движение оставалось непостижимой тайной для древних мудрецов — их мышление было сугубо конкретным. Даже богов они наделяли человеческим обликом, а герои и чудовища выходят за пределы реального только своими масштабами: Геракл — силой, Аргус — количеством голов. Пределом абстракции для древних мыслителей было число и простейшие геометрические фигуры. В построении системы чисел они сделали лишь два шага. Простые числа, при помощи которых можно считать предметы, и простые дроби — отношения простых чисел, позволяющие делить то, что поддается делению. Когда Пифагор обнаружил несоизмеримость диагонали квадрата с его сторонами, если их размер — единица, он велел ученикам сохранить это в тайне. Существование величин, несопоставимых с простыми дробями, казалось ему ниспровержением основ. Страх перед такими величинами привел к застою математики на два тысячелетия.

Дымные костры инквизиции еще подсвечивали гнетущую ночь средневековья, когда Коперник, Кеплер и Галилей, отбросив древние предрассудки, положили начало новой науке о небесных и земных движениях. Коперник и Кеплер сосредоточили свои усилия на движении планет. Галилей, кроме того, стремился понять законы, лежащие в основе движений обычных земных тел и механизмов. Так возник фундамент современной науки, в который вошла мощь абстрактного мышления и сочетание все более сложной математики с искусством опытного исследования природы, пионером которого по праву считается Галилей. Под этим фундаментом сохранились, обеспечивая его устойчивость, древние блоки арифметики и алгебры, геометрии и логики, астрономических наблюдений и законов рычага. Конечно, кое-что пришлось удалить, иное лишь впоследствии вошло в общий монолит знаний после многовекового забвения.

Ньютон хорошо сказал, что ему удалось создать что-то новое только потому, что он стоял на плечах гигантов. Великолепный труд «Математические начала натуральной философии» сообщал людям суть научного метода, развитого Ньютоном на основе, заложенной Галилеем.

Вот этот метод: исходя из опыта обнаруживать «принципы» — фундаментальные свойства природы; на основе «принципов» строить законы — математические зависимости, связывающие между собой различные характеристики явлений и процессов, полученные из

измерений; при помощи законов выводить следствия, поддающиеся проверке путем специально поставленных новых опытов. Этот метод и сейчас надежно служит ученым, успешно сочетаясь с методами гипотез. Конечно, речь идет не о гипотезах, придумываемых для объяснения отдельного частного явления, с которыми так страстно боролся Ньютон. Каждая гипотеза такого рода обычно требует дополнительных гипотез, объясняющих, почему новая гипотеза не противоречит другим явлениям или другим гипотезам, и этой порочной цепи нет конца. Но Ньютон сам с большим искусством создавал гипотезы другого рода. Их скорее следовало бы называть «пробными принципами». Они с самого начала строятся так, что оказываются согласующимися со множеством фактов и явлений или хотя бы с широким кругом родственных процессов, и способны вести к предсказаниям, поддающимся проверке опытом. Ко времени появления «Начал» Ньютон уже был известным и общепризнанным ученым. Но не это явилось причиной совершенно необычного успеха его книги — она оказалась распроданной так быстро, как сейчас расходятся бестселлеры, хотя это был не детектив, а сложный научный труд. Причина заключалась в революционном содержании «Начал». Впервые ученому удалось связать общими законами земные и небесные явления. Объяснить на основе механики процессы, не имеющие видимой общности с какими-либо механизмами.

«Начала» стали не только вершиной науки, но началом нового быстрого прогресса различных ее областей. Метод, созданный Ньютоном, оказался очень аффективный, а результаты, полученные им, столь эффектными, что многие поколения ученых, взяв на вооружение его метод, стремились, подобно ему, объяснить при помощи законов механики весь окружающий мир, со всеми его особенностями и част-частностями. И это удавалось. Казалось, нет предела возможностям механического объяснения природы.

Поразительные успехи механики и ее применений к другим областям физики привели к далеко идущим последствиям. Некоторые важнейшие понятия механики Ньютона были восприняты философами и обобщены ими далеко за пределы, первоначально установленные их автором. Затем возникло то, что инженеры называют обратной связью, что зачастую ведет к возникновению самовозбуждающихся колебаний, нередко приводящих к катастрофическим последствиям. Ученые начали применять эти же понятия уже не как атрибуты механики, а как философские категории. Так случилось, в частности, с понятиями пространства, времени и причинности. Реальное пространство и время были отождествлены с абсолютным пространством и временем механики Ньютона. А причинность, трудами великого математика и механика Лапласа, была сведена к детерминизму: к жесткой связи между различными этапами механических процессов. Связи, описываемой уравнениями движения.

Сложившаяся ситуация вначале не только не мешала прогрессу науки, но и способствовала ему. Кристальная ясность и строгость уравнений механики, торжество причинности импонировали людям, склонным к исследовательской работе. Они стремились изгнать из науки малейшую неясность и произвол. Механика и ньютоновский метод познания природы всегда приводили к цели. Казалось, успехам методов механики никогда не будет конца.

Максвелл пытается обмануть себя

Дальнейшее в существенной мере покоится на новаторских работах Фарадея. Этот гениальный самоучка не получил систематической подготовки и в течение всей жизни испытывал трудности в области высшей математики. К счастью, в то время еще удавалось сделать многое на основе элементарных расчетов. Конечно, и тогда требовалась способность интуитивного понимания связей, скрытых за явлениями природы. В этом отношении равным Фарадею был впоследствии, по-видимому, лишь Бор. Фарадей, подобно Ньютону, интуитивно чувствовал неудовлетворенность оттого, что для объяснения взаимодействия тяжелых тел и электрических зарядов приходится привлекать дальнодействующие силы. Но

если в области механики им не было видно замены, то в области магнетизма дело обстояло иначе.

Более того, в 1820 году Эрстед обнаружил доселе неведомую силу, никак не укладывающуюся в ряд уже изученных сил, действующих не только в механике, но и в экспериментах с электричеством и магнетизмом. Все силы, с которыми встречались физики: сила тяготения, сила электростатического притяжения или отталкивания, сила притяжения или отталкивания полюсов магнитов и другие действовали по прямым, соединяющим тела — источники силы. Это позволило Ньютону, а затем его последователям применить геометрию и математику для формулировки законов действия сил. Так возник закон тяготения и его близнец — закон Кулона, определяющий взаимодействие наэлектризованных тел.

Эрстед изучал влияние электрического тока на намагниченную иглу. Он протянул прямолинейный провод вдоль стрелки компаса, указывающей на север и юг. Когда провод был присоединен к электрической батарее, стрелка компаса повернулась поперек своего начального положения. Эрстед был потрясен. Он понял, что сила, действующая между магнитным полюсом и элементом тока, направлена не вдоль соединяющей их прямой, а в поперечном направлении. Эрстед назвал эту силу «поворачивающей силой». Статья Эрстеда была написана по-латыни. В то время мода на латынь миновала и большинство научных журналов выходило на живых языках. Переводчик, а он, несомненно, был ученым, работавшим в близкой области, не был уверен в том, что правильно понял Эрстеда, и в примечании дал латинский оригинал той части его статьи, где говорилось о «поворачивающей силе». В таком же замешательстве были и читатели. Экспериментаторы проверили и подтвердили опыты Эрстеда. Био и Савар установили зависимость этой силы от расстояния, а затем была определена и ее зависимость от силы тока. Но причина «поперечности» направления действия силы оставалась совершенно непонятной.

Так появился первый факт, противоречащий самому духу ньютоновской механики.

Следуя методам Ньютона и используя гипотезу светового эфира, Фарадей объяснил явление магнетизма действием особых натяжений эфира. Ему удалось сделать еще один шаг. Огромный шаг. Связать между собой электрические и магнитные явления. Так возникли законы электромагнитной индукции.

Следующий шаг сделал Максвелл. Он тоже следовал методам Ньютона: отыскивать в явлениях природы общие принципы, получать из них законы, выраженные на языке математики, и извлекать из них следствия, доступные опытной проверке. При этом, однако, он смело прибегал к гипотезам и к тому, что теперь иногда называют «экспериментальной математикой», или методом математических гипотез. Он смело вводил в уравнения новые члены, добиваясь симметрии уравнений и придавая им такой вид, который лучше соответствует всей совокупности опытных фактов. При этом Максвелл искусно опирался на метод аналогий, на механические модели, ибо он стремился строить теорию электричества и магнетизма на основе механики Ньютона.

Исходным принципом было единство электрических и магнитных явлений, установленное Фарадеем. Оно требовало объединения известных ранее, но выступавших как независимые, законов электричества и магнетизма: закона Кулона, описывающего взаимодействие между электрическими зарядами; закона индукции Фарадея, объяснявшего, каким образом движущийся магнит возбуждает электрический ток в металлических проводниках. Максвелл сумел найти недостающие зависимости и описать все эти разрозненные законы при помощи единой системы из четырех взаимосвязанных уравнений. Самым трудным при этом, требовавшим не только гениального предвидения, но и смелости, явилось введение в одно из уравнений дополнительного члена, никак не связанного с известными законами и, более того, с известными явлениями. Этот член нужен был для придания уравнениям симметрии, для достижения чисто математической завершенности.

Современникам, да и многим потомкам этот член казался совершенно абсурдным, ибо он соответствует электрическому току, проходящему через пустоту. Явление невиданное и казавшееся невозможным. Абсурдный член сыграл в истории развития знаний роль,

аналогичную той, которая впоследствии выпала на долю легендарной «аш» (h) Планка. Чисто формальный шаг привел к пониманию физической картины Вселенной.

Максвелл не сразу осознал, что уравнения подсказали ему возможность самостоятельного существования в пустом мировом пространстве электромагнитных волн. Максвелл не сразу поддался обаянию простой картины мира, нарисованной его уравнениями. Для него было естественнее предположить, что электромагнитные волны являются движущимися волнами эфира. Ведь Максвелл, как и все его современники, находился под глубоким влиянием механики Ньютона и считал высшей целью науки объяснение всех явлений природы при помощи механики. Поэтому он настойчиво пытался построить механическую модель, способную отобразить все электромагнитные явления, в том числе и электромагнитные волны. Сохранились многочисленные эскизы различных механических конструкций, созданных воображением Максвелла на основе его уравнений. Многие из них представляют собой бесконечные наборы различных связанных между собой шестеренок, скомбинированных так, чтобы они моделировали волновые движения. Теперь нам, живущим в совершенно иную эпоху, кажется удивительным и странным, как гениальный создатель электродинамики мог надеяться на то, что ему удастся представить оптические явления при помощи комбинации движений множества шестеренок! Осознать это можно, лишь вспомнив, в какую эпоху он учился и творил.

Все усилия оставались тщетными. Модель могла иллюстрировать одно или несколько единичных явлений. Но никакая механическая модель не в силах объединить в себе всю совокупность разнообразных электромагнитных явлений. То, что у Фарадея было чрезвычайно простым, при механической трактовке становилось весьма сложным. Максвелл сам чувствовал, что созданная им теория переросла пределы возможностей механических моделей. В последующей работе он обходится без этих механических подпорок. Он стремится убрать строительные леса и формулирует теорию в замкнутой математической форме. Он пишет: «Теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией электромагнитного поля потому, что она имеет дело с пространством, окружающим электрические или магнитные тела, и она может быть названа динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении...» Дальше констатации того факта, что в мировом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, Максвелл, конечно же, не мог пойти. И так это было крамольное утверждение, ниспровергающее основы. И Максвелл сосредоточился на математическом углублении своей теории. Рождалась новая наука — электродинамика. Максвелл поставил своей целью...показать, каким образом непосредственным применением идей и методов Фарадея лучше всего могут быть выяснены взаимные отношения различных классов открытых им явлений». Он пишет: «...Я имею в виду представить фарадеевскую теорию электричества с математической точки зрения...»

На эту титаническую работу ушло десять лет. Но полученные результаты не встретили признания. Одних смущали математические гипотезы. Они считали теорию спекулятивной. Другие не могли понять ее сложной математики, принять непривычное абстрактное понятие поля. Отлично сознавая значение своей работы, Максвелл решается на необычный шаг. Он отказывается от всякой служебной деятельности и, уединившись в родном доме, в течение последующих восьми лет пишет «Трактат по электричеству и магнетизму». Этот выдающийся труд представляется нам, людям XXI века, образцом систематичности и ясности. Основные уравнения теории вобрали в себя всю совокупность известных фактов и, как мы теперь знаем, много неизвестного ни самому Максвеллу, ни его современникам. Именно они породили крылатую фразу о том, что уравнения зачастую знают больше, чем их создатель. Ведь в то время, когда Максвелл писал свой «Трактат», многие основные выводы теории еще не были получены.

Несмотря на то, что физическое содержание уравнений Максвелла не только не могло быть проиллюстрировано при помощи механических моделей, но и не поддавалось сведению к уравнениям движения ньютоновской механики, уравнения Максвелла, по существу,

чрезвычайно точно соответствовали идейным основам, заложенным Ньютоном. Уравнения Максвелла, как и уравнения движения, являются законом, вернее, математической формулировкой закона, следующего из немногих «принципов», выражающих объективные закономерности природы, в данном случае связи между электрическими зарядами, токами и магнитами. Эти уравнения, в свою очередь, объясняют всю совокупность известных опытных фактов и предсказывают новые неизвестные явления без привлечения дополнительных гипотез.

Для Чего нужны мировые константы

Еще одна существенная черта сближает между собой великие творения Ньютона и Максвелла. Как и уравнения механики, система уравнений Максвелла содержит постоянные множители, неполучаемые из исходных «принципов». В законе тяготения — это гравитационная постоянная, в уравнениях Максвелла это диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества. Эти множители можно определить только путем измерений. Но кощунство заключалось в том, что Максвелл приравнял к веществу... пустое пространство!

Структура уравнений Максвелла требовала, чтобы пространству, свободному от каких-либо тел, были приписаны вполне определенные свойства. И выражаться они должны численными значениями величин, имеющих смысл диэлектрической и магнитной проницаемости пустого пространства.

Людям той эпохи казалось недопустимым думать о каких-то конкретных характеристиках совершенно пустого пространства, и было вполне естественно приписать эти проницаемости эфиру, заполняющему пространство. Поэтому те, кто верил в эфир, были довольны: существование эфира получило как бы новое подтверждение. Максвелл же не ставил себе целью утверждать или отвергать эфир, он размышлял над новой загадкой, которую преподнесли ему его уравнения. Загадка таилась в удивительном совпадении значения квадратного корня из произведений диэлектрической и магнитной проницаемости эфира с величиной скорости света в пустоте... Именно этот намек послужил для Максвелла убедительной основой, чтобы считать свет одним из видов электромагнитных волн...

Сделаем отступление — несколько слов о мировых константах. Гравитационная постоянная q и скорость света c знакомы нам со школьной скамьи. Физики знают магическое число 137, которое получается из комбинации важнейших констант: скорости света, заряда электрона и по-постоянной Планка. Почему это число равно именно 137? Это одна из загадок, объяснения которой не найдено до сих пор. Таково свойство природы, это дают измерения — единственно, что объективно может констатировать ученый.

Много волнений связано и с другими константами, входящими в формулы, которые зарекомендовали себя как основа наших знаний.

Присутствие в теории и в ее уравнениях постоянных величин, получаемых из измерений, представляет собой характерную особенность феноменологических теорий. По мере углубления теории, количество таких независимых эмпирических (получаемых из опыта) постоянных уменьшается. Целью каждой теории является вычисление большинства постоянных, исходя из уравнений самой теории и из возможно меньшего количества постоянных, лежащих за пределами теории. Такие постоянные возводят в ранг универсальных постоянных, иногда их называют мировыми константами.

С повестки научных обсуждений по сей день не сходит вопрос: почему существуют именно те универсальные постоянные, которые нам известны, и почему их величины именно таковы, какую дают результаты измерений? Это не перестает тревожить ученых. Их высшей целью остается создание теории, способной объяснить все. Универсальные постоянные всегда возникали как привязка теории к реальному явлению. Ведь так было и с постоянной Планка h , и со скоростью света c , и с гравитационной постоянной q , и со всеми остальными мировыми константами. То же произошло и с константами Максвелла — они вошли в теорию не по его капризу, а в силу интуитивной уверенности в объективном существовании

природы.

Дедуктивное изложение теоретической части «Трактата» Максвелла, вся абстрактная структура его теории, как уже упоминалось, мешали ее усвоению. Несмотря на ее успехи, в большинстве университетов мира вплоть до начала XX века профессора излагали оптику Френеля, трактуя свет как упругие волны эфира. Профессора поступали так не из снисхождения к невежеству студентов, а потому, что сами не понимали всю глубину теории Максвелла или даже не были с нею знакомы. Наиболее разительным доказательством трудности понимания идей Максвелла для его современников являются лекции выдающегося физика Больцмана, которые он в 1891 году, излагая теорию Максвелла, начал строками из «Фауста»:

Я должен тяжким потом исходить,
Чтоб вас тому, чего не знаю, обучить.

Больцман считал, что теория Максвелла остается для большинства современных ему физиков книгой за семью печатями, но понимал необходимость ознакомления с ней будущих физиков. Далеко не каждый профессор решится сообщить студентам, что он сам еще не вполне овладел излагаемым предметом. Борн вспоминает, что знаменитый автор курса оптики Шефер еще в 1897 году говорил в лекциях только об упругих волнах эфира.

Первым, кто понял важность работы Максвелла, был молодой лейденский студент Лоренц. Он случайно наткнулся в журналах, пылившихся на полках библиотеки, на статьи Максвелла, посвященные синтетической теории электромагнетизма. Ясность и монолитность, с которыми перед ним предстала обширная и дотоле несвязная совокупность разнообразных электрических и магнитных явлений, поразили воображение Лоренца. После того как порыв восторга уступил место творческому возбуждению, Лоренц приступил к систематическому изучению теории Максвелла. Он начал применять ее к решению различных конкретных проблем и частных задач, связанных с многочисленными экспериментами, до того порождавшими различные, порой весьма частные, гипотезы, способные объяснить только данный опыт. Теория Максвелла позволила разобраться во всех сомнительных случаях, не требуя никаких дополнительных гипотез. Лишь одно оставляло чувство неудовлетворенности — необходимость введения в расчеты феноменологических постоянных. Лоренц задался целью дополнить теорию Максвелла так, чтобы новая теория содержала все необходимое для вычисления этих постоянных, исходя лишь из небольшого количества первичных универсальных постоянных. Мысленно оглядев все известные ему опыты, проведенные различными исследователями, Лоренц обнаружил один из циклов замечательных опытов Фарадея, не использованных Максвеллом при создании его теории. Более того, этот цикл опытов лежал как бы в стороне от теории, не нуждаясь в ее объяснениях и не противореча ей. Это был электролиз. Что-то подсказало Лоренцу — не проходи мимо, задержись...

Сила Лоренца

Явление электролиза возникает при пропускании электрического тока через растворы. Известны жидкости, практически не пропускающие электрического тока, например многие масла. Но имеются и жидкости, очень хорошо проводящие электрический ток. Таковы растворы некоторых солей. Фарадей обнаружил, что при пропускании электрического тока через такие жидкости на электродах выделяются слои металла или пузырьки газа. Фарадей был блестящим экспериментатором, изобретательным, наблюдательным и вдумчивым. Он, как никто до него, умел придумывать опыты, способные ответить на интересовавший его вопрос, и толковать их результаты. Еще лучше он умел формулировать вопросы, подлежащие проверке. А правильно поставленный вопрос в существенной мере определяет ценность ответа.

Фарадей впервые соединил последовательно несколько сосудов с различными проводящими жидкостями. Он назвал такие жидкости электролитами, а пластины, введенные

в сосуды, соответственно: анодом — тот, на котором выделяется кислород, и катодом — на котором выделяются водород или металлы. Наблюдая результат прохождения электрического тока через цепочку сосудов, Фарадей обнаружил, что отношения весов различных металлов, выделяющихся на катодах сосудов, всегда остаются одинаковыми, несмотря на изменения силы тока и времени его действия. Эти отношения не меняются при замене данной соли, содержащей применяемый металл, другой солью этого же металла. Так Фарадей установил основной закон электролиза: химическое действие тока пропорционально количеству прошедшего электричества. В отличие от предшественников, Фарадей считал, что разложение солей не есть результат действия тока. Он ввел гипотезу о том, что электролиты под действием внутренних сил самой жидкости распадаются на ионы двух типов. Электрический ток лишь переносит их к аноду и к катоду. Те, что оседают на анодах, он назвал анионы, на катоде — катионы. Другими словами, носителями тока в электролитах, по мнению Фарадея, являются заряженные частицы — анионы и катионы. О природе электрического тока в проводниках Фарадей не высказывался столь определенно.

Он писал: «Под током я разумею нечто распространяющееся, будь то электрический флюид, или два движущихся в противоположных направлениях флюида, или только колебания, или, выражаясь еще более обще, распространяющиеся силы».

Пусть Фарадей не знал, что такое электрический ток. Очень важно, что он наконец-то сказал слово об электрически заряженных частицах. Лоренц сохраняет основную идею Фарадея, воплощенную Максвеллом в «Трактате»: электромагнитные взаимодействия осуществляются посредством поля. А так как Лоренц верил в эфир, то именно его считал носителем поля. По его мнению, эфир неподвижен и проникает во все тела.

Это заблуждение не помешало ему сделать великий шаг. Лоренц предположил, что любые тела, а не только электролиты, как считал Фарадей, состоят из маленьких заряженных частиц, существующих в эфире, погруженных в него. Став на эту точку зрения, Лоренц пересмотрел строение веществ, электромагнитных полей и их взаимоотношения. Он догадался, что число частиц, несущих положительные заряды, в обычных условиях равно числу отрицательно заряженных частиц. Поэтому все тела, за исключением особых случаев, электрически нейтральны. Компенсация разноименных зарядов обеспечивает нейтральность и твердых тел, и жидкостей, и газов. Как повлияет на нейтральные тела внешнее электрическое поле? — спросил он себя. Поле, вызывающее движение ионов, обнаруженное Фарадеем в растворах электролитов, может вызвать в твердых или жидких диэлектриках только небольшие местные смещения заряженных частиц. Поэтому их заряды внутри диэлектрика остаются скомпенсированными. Избыточные заряды проявляют себя только на поверхности диэлектриков.

Но только ли этим выдают свое присутствие заряды, скрытые в диэлектрике? Нет, решил Лоренц, они «нагружают» эфир подобно тому, как мелкие плавающие предметы или слой масла нагружают поверхность воды, замедляя скорость бегущих по ней волн. Заряженные частицы замедляют скорость электромагнитных волн, в том числе скорость света в прозрачных телах. И Лоренц создал теорию, которая позволяет вычислить это замедление, вычислить скорость света в прозрачных телах, а значит, и диэлектрические постоянные, входившие в теорию Максвелла как эмпирические величины, определяемые из опыта. Уже одно это обеспечивало Лоренцу почетное и заметное место в истории физики.

Теория Лоренца позволила объяснить и таинственное явление, открытое Холлом. Оно состоит в появлении напряжения, направленного поперек проводника, если вдоль него течет электрический ток и проводник подвергается действию сильного магнитного поля. В течение пяти лет ученые ломали голову над этим загадочным явлением. Лоренц показал, что это, результат действия магнитного поля на электрические заряды, образующие ток в проводнике. Магнитное поле отклоняет их в поперечном направлении, что и приводит к возникновению напряжения, обнаруженного Холлом. Мы знаем теперь, что тот же механизм приводит в действие электромоторы. Магнитное поле, действуя на заряды, образующие электрический ток, вызывает движение проводника, по которому течет ток. Если проводник

закреплен неподвижно, то смещаются лишь текущие по нему заряды, возникает эффект Холла. Сила, действующая на заряды, движущиеся в магнитном поле, была названа «силой Лоренца». Она играет важнейшую роль в науке и технике.

Прежде чем представления Максвелла о самостоятельной природе электромагнитных волн слились с фактом существования заряженных частиц Лоренца, должен был родиться электрон. Честь открытия электрона принадлежит Дж. Дж. Томсону, он же определил величину его заряда и массы. Конечно, это открытие возникло не на пустом месте. Еще в 1862 году Вебер полагал, что с весомыми атомами связаны электрические атомы. Максвелл высказал мысль о том, что явление электролиза связано с молекулами электричества, но не развил эту мысль и не ввел молекулы электричества в свою теорию. В 1874 году Стоней, выступая на заседании Британского физического общества, предположил, что в природе есть три «естественные единицы»: скорость света, постоянная тяготения и заряд электрического атома. Он даже определил величину этого атома, разделив количество электричества, затрачиваемого на получение при помощи электролиза одного кубического сантиметра водорода, на число атомов водорода в этом объеме. Стоней предложил называть этот электрический атом электроном.

Через шесть лет Гельмгольц, по-видимому не зная о выступлении Стонея, говорил в своей фарадеевской лекции об электрических зарядах ионов, играющих роль атомов электричества. Это была идейная линия, приведшая к теории Лоренца. Параллельно развивались эксперименты. Начало им положил Гитторф, изучавший электрические разряды в разреженных газах. В 1869 году ему удалось снизить давление в разрядной трубке менее чем до 1 мм ртутного столба. При этом он заметил, что темное, несветящееся пространство, до того прилежавшее к катоду трубки, начало быстро увеличиваться, захватывая весь ее объем. Теперь вся внутренняя часть трубки стала темной, но стенки начали сильно флюоресцировать. При этом светящиеся места на стенках можно было перемещать, воздействуя на трубку магнитом. Конечно, это был явный намек на электрическую природу свечения. Исследования Гитторфа через десять лет продолжил Крукс. Проведя целый цикл эффектных опытов, Крукс писал: «...явления в этих разреженных трубках открывают перед физикой новый мир — мир, в котором материя существует в четвертом состоянии; мир, к которому применима корпускулярная теория света, — здесь свет не всегда движется по прямой линии; мир, в который мы никогда не будем в состоянии войти и по отношению к которому мы должны удовлетворяться наблюдениями и опытами со стороны».

Открытие Крукса вызвало волну интереса, а его опыты стали любимой демонстрацией не только в физических лабораториях, но и в частных домах. Однако объяснения Крукса встретили возражения, и почти двадцать лет большинство физиков предпочитало объяснять опыты Крукса особыми волнами эфира. Но сам Крукс считал, что открыл особые катодные лучи. Воззрения Крукса приобрели право гражданства, лишь когда Перрен обнаружил, что катодные лучи несут с собой электрические заряды.

Дж. Дж. Томсон писал: «Исследования, которые привели к открытию электрона, начались с попытки объяснить расхождения между поведением катодных лучей в магнитном и электрическом полях». Томсон измерил отношение заряда частиц, составляющих катодные лучи, к их массе и нашел, что этот заряд совпадает с зарядом, переносимым при электролизе. Измерения показали, что масса частицы катодных лучей меньше, чем одна тысячная массы атома водорода. Теперь мы знаем, что масса электрона в 1840 раз меньше массы протона — ядра атома водорода.

Томсон понял, что явления, открытые Круксом, свидетельствуют о делимости атомов. Из любого атома под действием электрического поля, удара быстро движущихся частиц, ультрафиолетового света или тепла можно вырвать одинаковые частицы, несущие одинаковый отрицательный заряд. Томсон говорил об электронах — это они давали о себе знать в трубке Гитторфа, это их наблюдали Крукс и Перрен. Так, одновременно, был открыт электрон и подтверждена атомная структура вещества путем отказа от многовекового представления о неделимых атомах. Атомы существуют, но они делимы!

Откуда подул эфирный ветер

Воображение Лоренца заработало с новой силой. Перед ним было добытое Максвеллом знание о том, что Вселенная пропитана электромагнитным полем, и теперь он знал, что частицами, взаимодействующими с этим полем, являются электроны. Как они взаимосвязаны друг с другом, то есть какова структура Вселенной, ее плоть и кровь? Лоренц угадал, что электромагнитное поле Максвелла не нечто изолированное и оторванное от материи. Нет, в плоть поля природой вкраплены электроны — эти элементарные частицы электричества, входящие в состав нейтральных атомов. Сочетание электрических зарядов, связанных с веществом, и электромагнитного поля образует все многообразие мира, все материальные тела. Лоренц нарисовал и механизм дыхания этой Вселенной: движение зарядов порождает электромагнитное поле, а волны поля в свою очередь вызывают движение зарядов.

Электромагнитная теория Фарадея — Максвелла — Лоренца стала на твердую почву. Теория поля слилась воедино с представлением об атомной структуре вещества. Еще один раздел классической физики казался полностью завершенным. Но недаром говорят: в науке каждый решенный вопрос ставит новые нерешенные проблемы.

Разгорелся спор о применимости уравнений Максвелла к движущимся телам, — ведь они были созданы для неподвижной среды. Особенно горячие дискуссии возникли между Лоренцем и Герцем. Таковы противоречия творчества — Лоренц, сделавший новаторское дополнение к теории Максвелла, не верил в самостоятельную сущность электромагнитных волн. Он верил в эфир и считал свет колебаниями волн эфира. В теории Лоренца эфир неподвижен, и сквозь него движутся все тела, нейтральные или заряженные частицы вещества... Эфир выступает как нечто неподвижное, абсолютное, сродни Ньютону абсолютному пространству. Возникает искушение считать, что принцип относительности Галилея тут не работает и неподвижный эфир может служить надежной базой для определения абсолютного движения в пространстве.

С этим был не согласен Герц, замечательный экспериментатор, которому посчастливилось через двенадцать лет после создания Максвеллом его теории обнаружить реальное существование электромагнитных волн. Герц был не только экспериментатором. Как теоретик он исходил из того, что электромагнитные процессы в движущихся телах подчиняются тем же законам, что и в неподвижных. Тем самым он распространял принцип относительности Галилея с механических явлений в область электромагнитных процессов. Но он тоже верил в эфир. Чтобы удовлетворить принципу относительности, Герц предположил, что эфир, заключенный внутри тел, принимает участие в их движении. Но ему самому было ясно, что это предположение является вымыслом того сорта, с которым боролся Ньютон. Сразу понадобилась новая гипотеза, чтобы связать части эфира, движущиеся с телами, с остальным неподвижным эфиром. Каждое движущееся тело, подобно ложке, перемещающейся сквозь кисель, должно было тянуть за собой «эфирный хвост».

Кто же прав? Положение усугубляется тем, что Лоренца подводят его же уравнения. Они преподносят Лоренцу сюрприз. Вычисляя скорость света в движущейся среде, он приходит к неожиданному результату: решение уравнений таково, как будто эфир, заключенный внутри тела, следует за его движением. Лоренц написал свои уравнения, предполагая, что эфир всегда неподвижен, а решения уравнений показали, что он должен частично увлекаться движущимися телами. Получается парадоксальное положение: уравнения Лоренца не удовлетворяют принципу относительности, но их решения с большой точностью удовлетворяют ему!

Так это началось. В теории Герца скорость света в движущихся и покоящихся средах одинакова. В теории Лоренца она различна. В спор вмешался сам Максвелл. Незадолго перед смертью он указал на опыт, который мог бы стать арбитром. Его письмо редактору журнала

«Нейчур» было опубликовано в 1886 году, уже после смерти автора. Максвелл писал: можно, хотя чрезвычайно трудно, определить из опыта скорость движения Земли сквозь эфир, подобно тому, как можно определить скорость корабля, измеряя скорость звука. Имеется в виду, конечно, что скорость звука измеряется на палубе, где воздух не участвует в движении корабля, а не в каюте, где такие измерения не позволяют узнать ничего, в соответствии с принципом относительности Галилея.

Этот спор воспламенил молодого офицера Военно-морского флота США Майкельсона. Он решил провести опыт, предложенный Максвеллом. После двухлетней морской службы он начинает преподавать физику и химию в Военно-морской академии в Аннаполисе. У него мало опыта и знаний. Он едет учиться в Европу. В Берлинском университете в лаборатории великого Гельмгольца Майкельсон знакомится с посмертной статьей Максвелла и приступает к опытам. Его цель — поймать эфирный ветер. Он строит соответствующую установку — но... эфирного ветра не обнаруживает...

Жизнь с открытой раной

Лоренца очень занимает этот опыт. В соответствии с его теорией результат должен быть положительным, ведь Земля перемещается в недвижимом эфире, и приборы должны обнаружить, как эфир «обдувает» Землю. Лоренц проверяет расчеты молодого физика и обнаруживает в них ошибку. Измеряемая величина должна быть вдвое меньшей, чем ожидал Майкельсон. Вопрос остается открытым...

Проходят шесть лет. Майкельсон не забыл своего намерения. Он готовится к более решительному наступлению на эфирный ветер. Теперь он не один. Вернувшись из Европы, он преподает в Кливленде, штат Огайо, и дружит с Мор-ли, преподавателем химии из соседнего университета. По-разному коротают время их коллеги. Майкельсон же, нарядный, безупречно выбритый, и Морли, рассеянный, небрежный в одежде, с рыжей щетиной на щеках, спускаются в подвал лаборатории, где и проводят все свободное время.

Тут смонтирован прибор для обнаружения эфирного ветра. Их опыт (1887 год) одна из поворотных точек в судьбе физики, хотя достичь цели не удалось — эфир не был обнаружен. Вот как пишет современный ученый о значении этого опыта: «Никогда раньше в истории науки отрицательный результат опыта не был столь разрушительным и столь плодотворным. Майкельсон решил, что его эксперимент не удался. Он никогда не думал, что эта «неудача» сделает его опыт одним из наиболее значительных, революционных экспериментов в истории науки».

Как встретили ученые весть о неудаче Майкельсона и Морли? Австрийский физик Мах немедленно заявил, что представление об эфире надо отбросить, он не верит в абсолютное движение через эфир. Одни ученые его поддержали, другие метали громы и молнии. Начались споры — есть ли эфирный ветер или его нет, может быть, эфир следует за Землей и потому необнаружим. Решающим голосом никто из ученых тогда не обладал. Возникла парадоксальная ситуация. Один-единственный опыт свидетельствовал против всех остальных, возможно, он свидетельствовал в пользу Герца против теории Лоренца. Все остальные опыты соответствовали теории Лоренца.

Однако в этом суде необходимо единогласие.

При одном «против» вопрос остается открытым.

Ирландский физик Фицджеральд высказал ошеломившую всех мысль: возможно, эфирный ветер давит на движущиеся предметы и... сокращает их размеры... Сокращает ровно настолько, что сводит результат опыта Майкельсона к нулю... Эту экзотическую гипотезу независимо высказал и Лоренц! Он добавил, что в движущихся сквозь эфир телах меняется и время... На движущейся Земле, где все одинаково сокращается, это сокращение невозможно заметить. Так было бы, если пытаться обнаружить усадку ткани при помощи «метра», изготовленного из той же ткани. Все эти изменения мог бы заметить лишь наблюдатель со стороны, находящийся вне Земли...

В этой любопытной гипотезе скорость света выступала как предел скорости тел, ибо длина тела, движущегося со скоростью света, при справедливости этой гипотезы, обращается в нуль, а время останавливается. Гипотеза Фицджеральда-Лоренца, выдвинутая специально для объяснения одного-единственного опыта, выглядела весьма искусственной, и большинство ученых отнеслись к ней с недоверием. Но лучших объяснений не было. Физики привыкали жить с открытой раной...

Много было передумано, переговорено на этот счет. Как тут не вспомнить простой мысленный эксперимент замечательного французского математика Пуанкаре. Что будет, спрашивает он, если однажды ночью, когда все мы крепко спим, Вселенная увеличится в размерах? Мы сами, атомы, столы и стулья, Солнце, Земля — все станет в миллион раз больше? Ничего не будет. Никто ничего не заметит. Но может быть, можно провести какой-нибудь эксперимент, чтобы обнаружить это общее увеличение Вселенной? Нет, такого эксперимента нет и не может быть. Ведь все приборы тоже изменили свои габариты в соответствии со всеобщим увеличением. Вот если бы увеличились в своих размерах, скажем, только Земля и все предметы на ней, это можно было бы увидеть с другой планеты.

То же произойдет и с изменениями течения времени, интервалов времени. Можно заметить только местные изменения времени, как, скажем, в знаменитом рассказе Уэллса «Новый ускоритель». Ученый открыл способ ускорения всех процессов в своем организме. Все в мире вокруг него замерло... Но если бы все ускорилося или замедлилося во всей Вселенной, никто бы ничего не заметил...

По существу, это тот же круг вопросов, над которым думал Галилей, постепенно приходя к пониманию закона природы, который он назвал принципом относительности. Размер предметов сравнивают с эталоном длины, часы сверяют с эталоном времени, для определения движения какого-либо предмета нужен другой предмет... Движение и покой, большое и малое, быстрое и медленное, верх и низ, левое и правое — все это равноправные, симметричные понятия. Ни одно из них не абсолютно, не выделено чем-то уникальным. Представляете, какую надежду возлагали ученые на эфир, который предлагал себя в качестве надежной, абсолютной опоры в этом мире относительности!

Мудрый Максвелл не зря предложил свой опыт. Если свет распространяется через неподвижный, неизменный эфир с определенной скоростью и если эта скорость не зависит от скорости движения источника, то скорость света может служить эталоном для определения абсолютного движения наблюдателя. И вот опыт, придуманный им, не обнаружил эфирного ветра. Нет ли его в природе, или он действительно так деформирует измерительный прибор, что делает незаметным свое присутствие?

Этот опыт был поставлен впервые, когда Эйнштейну было два года. И если следовать хронологии, то мнение Эйнштейна по этому поводу приводить еще рано. Но у нас — не история физики, скорее, роман мысли, драма идей, как говорил сам Эйнштейн. Поэтому как раз к месту подчеркнуть радикальный подход Эйнштейна к загадке эфира. Фицджеральд и Лоренц считали, что эфирный ветер искажает истинные размеры предметов и истинное течение времени. Они верили, что тела имеют абсолютные размеры — скажем, длину. Сокращение виделось им как физическое, реальное изменение длины, вызванное давлением эфирного ветра. И когда тела — в их уравнениях — сокращались, они воспринимали это как отклонение от «истинной» длины. Эйнштейн не только отбросил эфир как воплощение абсолютного покоя. Он отбросил понятие абсолютной длины и абсолютного времени. Вернее, счел, что понятия абсолютной длины или времени лишены смысла. Есть длина или время, полученные в результате измерения, и эти измерения меняются в зависимости от относительной скорости объекта и прибора, при помощи которого проводят измерения.

Если встречаются два космических корабля, то наблюдатель на каждом из них будет видеть другой корабль как бы укоротившимся в направлении движения. Эффект заметен при больших скоростях. Два велосипедиста при сближении этого не заметят. Сокращение их размеров при небольшой скорости очень мало. Фицджеральд сказал бы, что космический корабль меняет свои истинные размеры, свои абсолютные размеры. Эйнштейн понял, что

укорочение размеров — результат измерений данного наблюдателя. Для другого наблюдателя, связанного с другим космическим кораблем, измерения дадут другую величину сокращения размеров.

Так же обстоит дело и с течением времени. Ньютон считал само собой разумеющимся, что единое универсальное абсолютное время течет одинаково во всей Вселенной. Лоренц верил, что эфирный ветер искажает это «истинное» время при измерениях на движущихся телах. Эйнштейн отказался от понятия абсолютного времени, как от лишнего смысла. Имеются только местные времена. При встрече космических кораблей часы каждого из них покажут свое время. Это не будет «искаженное абсолютное время», это местное время, свое для каждой системы координат.

Итак, поворот в логическом восприятии событий можно описать так: нет «истинной» длины, нет «истинного» времени. Длина и время, понятие одновременности связаны с данной системой отсчета. Дело не в том, что один наблюдатель прав, а другой ошибается. Что у одного правильные приборы, у другого они врут. Просто показания приборов обусловлены движением системы отсчета и связанных с ней приборов. Эти показания объективны, они могут быть записаны автоматическими приборами. Результаты измерения длины, времени и, добавим, массы тела относительны и связаны с применяемой системой отсчета.

Мы забежали вперед. Но наша задача — не только изложение идей, главное — описание путей, приведших к тем или иным идеям, к переплетению различных точек зрения; понимание влияния стиля мышления отдельных ученых на ход событий, на результат коллективных усилий. Нам интересны борьба мнений, соперничество, единомыслие, противоборство, то, что составляет, определяет содержание конечного результата общих усилий в деле познания мира, что обуславливает, подготавливает подвиг ученых.

До Эйнштейна опыт Майкельсона — Морли, теории Лоренца и Герца противостояли в полном бессилии справиться с результатами реальных и мысленных опытов, наблюдений и умозаключений по поводу кардинальных проблем мироздания.

Как Эйнштейн пришел к своим феноменальным выводам? От каких противоречий оттолкнулся? Что взял из багажа науки в свое беспримерное путешествие в страну относительности? Попробуем понять и проследить самое ценное и важное для последователей — ход его мыслей... Еще раз окинем мысленным взором поле боя.

Чертики из коробочки

Механика Ньютона и все ее разветвленные следствия, включая кинетическую теорию материи, классическая термодинамика, так же, как все ее обширные ветви в химии, основывались на классическом принципе относительности Галилея. Все они сохраняли свою применимость, а их уравнения оставались неизменными, для процессов во всех телах, движущихся равномерно и прямолинейно.

Теория Максвелла и электронная теория Лоренца не удовлетворяли принципу относительности. Они утверждали возможность обнаружения движения тел относительно эфира, что запрещалось принципом относительности и опровергалось опытом Майкельсона. Примирить эти теории с опытом можно было, только отказавшись от формул, выражающих принцип относительности Галилея, заменив их преобразованиями Лоренца. Тогда автоматически возникало гипотетическое сокращение Фицджеральда — Лоренца и исчезала возможность обнаружения эфирного ветра в опытах Майкельсона. Но физический смысл преобразований Лоренца оставался неясным. Особенно загадочным была входящая в него формальная величина, которую Лоренц назвал «местным временем», или «кажущимся временем». В неподвижных телах эта величина совпадала с абсолютным временем теории Ньютона, но в движущихся телах она отличалась от него тем сильнее, чем больше скорость движения. При этом вновь выступал предельный характер скорости света: в телах, движущихся со скоростью света, «местное время» останавливается. Сам Лоренц при этом

продолжал считать покоящийся эфир и абсолютное время Ньютона истинной основой своей теории.

Две величайшие физические теории — механика Ньютона и электродинамика Максвелла — Лоренца противостояли друг другу в неразрешимом противоречии. Именно в это время, в 1905 году среди глубокой тьмы вспыхнул свет. Он исходил из двух статей начинающего ученого, безвестного патентного эксперта третьего класса Эйнштейна, обдумывавшего эти противоречия в свободное от работы время. Он понял, что теория Максвелла несовершенна сразу в двух отношениях: она не удовлетворяет принципу относительности и не описывает микроструктуру света. В двух статьях он устранил эти пороки.

Работая в полном одиночестве, лишенный доступа к научным библиотекам, Эйнштейн многого не знал и ко многому приходил самостоятельно, своими путями. Он не знал работу Лоренца 1904 года, а лишь его работы 1895 года.

Он не был знаком с исследованиями Пуанкаре. В его статье нет ссылки на какие-либо труды предшественников.

В своей статье он опирается лишь на уравнения механики Ньютона и уравнения Максвелла — Герца для пустого пространства. Он проверяет свои результаты на оптических явлениях: абберации, эффекте Допплера и давлении света. Эти явления, а также движение электронов используются в качестве пробных камней новой теории.

Исходный пункт работы выражен так: «Известно, что электродинамика Максвелла в современном ее виде приводит в применении к движущимся телам к асимметрии, которая несвойственна, по-видимому, самим явлениям». Эйнштейн указывает, что эти асимметрии должны были бы позволить определить, движется ли проводник относительно магнита или наоборот, то есть обнаружить абсолютное движение, что не соответствует свойствам реального мира. Вывод ясен: «Примеры подобного рода, как и неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды», ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя... Это предположение (содержание которого в дальнейшем будет называться «принципом относительности») мы намерены превратить в предпосылку и сделать, кроме того, добавочное допущение, находящееся с первым лишь в кажущемся противоречии, а именно, что свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью, не зависящей от состояния движения излучающего тела. Эти две предпосылки достаточны для того, чтобы, положив в основу теорию Максвелла для покоящихся тел, построить простую, свободную от противоречий электродинамику движущихся тел. Введение «светоносного эфира» окажется при этом излишним...»

В этих удивительно ясных фразах ставится четкая задача: создать теорию, симметрия которой полностью соответствует симметрии реального мира, совместить принцип относительности и постоянство скорости света. Два наиболее общих факта, установленных многочисленными и разнообразными опытами. Два факта, ставившие в тупик всех, кто пытался их примирить.

Прежде чем приступить к делу, Эйнштейн замечает: всякая теория должна основываться на кинематике реальных твердых тел, на соотношениях между твердыми линейками, часами и электромагнитными процессами. Недостаточное понимание этого является корнем всех трудностей, которые предстоит преодолеть. Сохраняя уравнения механики Ньютона, Эйнштейн отбрасывает его понятие абсолютного времени и показывает, что понятие одновременности является сложным понятием, зависящим от движения тел. Если учесть это и определить, как при помощи световых сигналов устанавливать ход и показания часов, расположенных в различных местах и перемещающихся друг относительно друга с постоянной скоростью, то противоречие между принципом относительности и постоянством скорости света исчезает. Исчезает роковая асимметрия теории. Ценой этого является замена простых преобразований Галилея более сложными. Эта замена вытекает как математическое следствие новых физических основ. Эйнштейн получает необходимые

математические формулы, не зная, что ими уже пользовался Лоренц, подобранный их как удобную математическую гипотезу. Так Эйнштейн, следуя идеологии Ньютона, вывел закон преобразования Лоренца из принципов обобщенного опыта. Именно поэтому Лоренц, получивший свои преобразования в результате математических проб, отвергал все попытки приписать ему честь создания теории относительности и справедливо считал ее создателем Эйнштейна. Он был старше по возрасту, но боготворил Эйнштейна. И они были добрыми друзьями. О теории относительности Лоренц говорил так: «Каждый любитель прекрасного должен желать, чтобы она оказалась правильной».

Еще Ломоносов писал: «Природа весьма проста; что этому противоречит, должно быть отвергнуто». Можно с уверенностью сказать, что Эйнштейн не был знаком с этим высказыванием, но во всем своем творчестве он постоянно следовал этому правилу. Теория должна возводиться на простейшей достоверной основе опытных фактов при наименьшем количестве предположений. В данном случае Эйнштейн взял за основу лишь два факта: скорость света постоянна, принцип относительности верен. Он обошелся всего одним дополнительным замечанием — предписанием того, как устанавливать часы. Из этого, как чертики из коробочки, появилось все: преобразования Лоренца, сокращение Фицджеральда — Лоренца, зависимость течения времени от скорости движения, принцип Доплера, известный ранее из опыта, закон абберации, тоже известный из опыта, уравнения движения электрона и зависимость его массы от скорости, связь массы и энергии, вычисленная ранее Абрагамом из специальной гипотезы, и в то время недоступная экспериментальной проверке, но приведшая к пониманию строения вещества и к овладению ядерной энергией. Все это богатство содержалось в двух статьях, появившихся с разрывом в несколько месяцев. А равноценным дополнением к ним была третья статья, содержащая открытие квантов света.

Эта третья статья, вместе с фундаментальной работой Планка, стала началом квантовой физики. Первые две завершили величественное здание классической физики. Они, подобно мощной арке, соединили два независимых здания — механику Ньютона и электродинамику Максвелла, каждое из которых выросло так высоко, что оба грозили рухнуть под грузом взаимных противоречий. Теперь они могли стоять вечно и постоянно служить людям во всех технических применениях за исключением полетов в дальний Космос и ядерной техники. Здесь необходимо обращаться к их продолжению — к теории относительности Эйнштейна.

ЛИФТ ЭЙНШТЕЙНА

Старт

Великие мыслители всех эпох стремились в своих построениях охватить многообразие природы с единой точки зрения. Высшим воплощением этих усилий стали философские системы. Каждая из многих противоборствовавших и сменявших одна другую философских систем претендовала на свою исключительную способность стать всеобъемлющей и завершенной системой. Материалистические учения считали философскую систему отражением внешнего мира. Идеалистические учения утверждали, что внешний мир есть плод философских построений. Только диалектический материализм нашел в себе смелость допустить возможность бесконечного развития не только во внешнем мире, но и в самом здании философской системы.

Сейчас нам предстоит совершить великолепный подъем. Подъем на лифте, при помощи которого его создатель поднялся так высоко, как ни до него, ни после него не поднимался одинокий путник. Если бы наука имела вершину, подобную Эвересту, то подвиг Эйнштейна можно было бы сравнить с достижением альпиниста, поднявшегося в одиночку от базового лагеря до вершины, лишь изредка на начальных этапах прибегая к помощи одного-двух спутников. Но наука — не горы. Она не имеет высочайшей вершины. В науке каждая покоренная вершина открывает вид на глубочайшие пропасти и новые вершины, за

которыми, сквозь туман, угадываются еще более высокие пики.

Прежде чем начать подъем, полезно еще раз оглядеть фундамент, над которым вознесся лифт. Ибо, как это практикуется теперь многими прогрессивными строителями, этот лифт был сооружен не внутри готового здания, а до него. Он одиноко возвышался над фундаментом, чтобы подымать строительные материалы для возведения будущих этажей.

В глубине многослойного фундамента науки о природе надежной основой лежат представления о том, что мир, в котором мы живем, существует независимо от нас и развивается по своим незыблемым законам. Лежит и уверенность в том, что человеческий разум способен познать этот мир во всех его мельчайших деталях, понять законы его существования и развития, выразить их математическими формулами, хотя это долгий трудный путь, не имеющий конца.

Теория относительности Эйнштейна, созданная им в 1905 году, быстро получила признание специалистов. Их привлекали ясность ее основ и единство методов. Она казалась многим вершиной человеческих возможностей. Неудовлетворенным остался лишь ее создатель. Только ему было ясно несовершенство его творения. Он понимал, что сделал всего лишь первый шаг. Следующий шаг он задумал и осуществил в полном одиночестве. Ведь он оставался в изоляции от других физиков. Его друзья Габиخت и Соловин покинули Берн уже в 1905 году. Прекратились даже домашние беседы с Бессо, инженером и сослуживцем по патентному бюро, — беседы, так помогавшие Эйнштейну при создании теории относительности. Бессо в этот период был, пожалуй, единственным связующим звеном с прошлым, он был почти членом семьи Эйнштейна — мужем Анны Винтелер, дочери любимого преподавателя Эйнштейна в кантональной школе в Аарау и сестры его друга Пауля Винтелера, который впоследствии стал мужем сестры Эйнштейна Майи.

Известно, как высоко ценил Эйнштейн свою работу в патентном бюро. Она обеспечивала ему средства для жизни и оставляла по 8 часов в день для занятий физикой. Он и друзьям советовал поступить в патентное бюро. «Подумайте, — писал он Габихту, — ведь кроме восьми часов работы остается 8 часов ежедневного безделья и сверх того воскресенье». Эйнштейн помог Бессо поступить в патентное бюро, и их духовная близость еще более укрепилась. Но не только дружеские и почти родственные связи сближали сослуживцев. Бессо владел обширными познаниями в математике и физике, в философии и технике и даже в социологии и медицине. Он обладал выдающейся способностью выслушивать собеседника и воспринимать новые идеи, иногда высказывая сомнения или уточняя детали. Эйнштейн считал его идеальным резонатором идей. Он делился с ним мыслями о роли принципа относительности в физике, и Бессо первый оценил их революционное значение. Он указал Эйнштейну на ряд неясностей, побуждая его вновь и вновь шлифовать аргументацию. Так родилась знаменитая статья «К электродинамике движущихся тел». Эта статья кончается фразой: «В заключение отмечу, что мой друг и коллега М. Бессо явился верным помощником при разработке изложенных здесь проблем и что я обязан ему за ряд ценных указаний».

Но верный помощник не мог следовать дальше по пути, избранному Эйнштейном. Он, как и все другие, убоился огромных трудностей, обширных, но туманных перспектив, мешавших решить, куда нужно направить следующий шаг. Путь этот начался с вопроса, возникшего сразу после осознания всеобщего значения принципа относительности. Принцип относительности верен для всех явлений природы, но почему он справедлив только для тел, движущихся прямолинейно и равномерно? Почему он теряет силу, как только тело испытывает ускорение? Почему скорость всегда связана с относительным движением различных тел, а ускорение может быть измерено внутри движущегося тела без всякой связи с другими телами и поэтому должно считаться абсолютным?

Для того чтобы ответить на эти вопросы, требовалось создать новую теорию, способную примирить относительность равномерных движений с абсолютным характером ускоренных движений. Причем математические формулы новой теории должны быть такими, чтобы при отсутствии ускорения они переходили в формулы прежней теории,

математическим воплощением которой являются преобразования Лоренца. Эйнштейн ставил перед будущей теорией еще одну задачу. Она должна учитывать и объяснить важнейший факт, остававшийся непонятым со времен Галилея, — факт, вошедший в законы механики Ньютона, но не объясненный, не понятый ни этим титаном, ни его последователями. Этим фактом является глубокая общность ускорения и тяготения. Эквивалентность тяжелой и инертной массы каждого тела, проявляющаяся в том, что все тела падают с одинаковым ускорением. Что же таится за этим многозначительным совпадением?

Жребий брошен

Обдумывая все многообразие фактов, даваемых опытом, и вопросы, недоступные существующим теориям, в том числе его теории относительности, Эйнштейн хотел создать всеобъемлющую теорию, замкнутую в себе. Это значит, что теория должна описывать все факты, входящие в область ее применимости, и предсказывать новые явления. Только таким путем — в духе Ньютона — можно проверять справедливость теории.

Величественная задача. Задача величайшей трудности. Десять лет Эйнштейн отдал размышлениям над этими вопросами. Выводы накапливались медленно, мучительно. Эйнштейн не сообщил ни в своих трудах, ни в автобиографических заметках, когда он понял, что нужно идти дальше. Но уже через два года после формулировки принципа относительности как основного свойства законов природы в неускоренных системах, после разработки теории относительности и ее первых триумфов он в статье «О принципе относительности и его следствиях», поступившей 4 декабря 1907 года в редакцию «Ежегодника радиоактивности и электроники», спрашивает читателя: «Можно ли представить себе, что принцип относительности выполняется и для систем, движущихся относительно друг друга с ускорением?» И продолжает: «Правда, пока еще нет возможности подробно обсуждать здесь этот вопрос. Но поскольку этот вопрос должен возникнуть перед каждым, кто следил за применениями принципа относительности до настоящего времени, я не могу не высказать здесь своего мнения на этот счет».

Эйнштейн снова увлекает читателя в неведомое. Он предлагает рассмотреть две системы: одну, движущуюся с постоянным ускорением, и другую — неподвижную, но находящуюся в однородном, то есть повсюду одинаковом поле тяжести. Первая система, подверженная постоянному ускорению, одинаково ускоряется по отношению к любым телам, свободным от внешних воздействий. Во второй системе все свободные тела ускоряются одинаково, падая в поле тяжести. Это общеизвестный опытный факт, впервые установленный Галилеем. Значит, обе системы ведут себя одинаково относительно всех свободных тел, или, точнее, свободные тела ведут себя одинаково по отношению к этим системам.

Так возникает первый ответ: наблюдение за поведением свободных тел не позволяет отличить равномерно ускоренное движение от действия однородного поля тяжести. И первый вывод: «...в дальнейшем мы будем полагать полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета. Это предположение распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета».

Жребий брошен. Первый шаг сделан. За ним последуют годы трудов и мучительных размышлений.

Прежде чем идти дальше, заметим, что Эйнштейн показал только эквивалентность однородного поля тяжести и равномерно ускоренного прямолинейного движения. Вопрос о неоднородном поле тяжести и неравномерном или непрямолинейном движении остался открытым.

Теперь нужно определить, как следует формулировать законы природы, если система движется с постоянным ускорением или испытывает действие поля тяжести, не изменяющего в пространстве. Можно ли записать законы природы на языке математики так,

чтобы их вид не подвергался изменениям при равноускоренных движениях в однородных гравитационных полях. Будет ли эта запись отличаться от той, к которой привела его теория относительности? Естественным кажется отрицательный ответ. Ведь мы знаем законы природы, пригодные в поле тяжести Земли. Они не позволяют предполагать что-либо неожиданное. Но, присмотревшись внимательнее, мы заметим, что все наблюдения осуществлялись в очень узком интервале, когда расстояние от места наблюдения до центра Земли изменялось только на несколько километров, примерно на $1/1000$ часть земного радиуса. При этом потенциал поля тяжести, характеризующий энергию тела в гравитационном поле Земли, меняется незначительно.

Анализ показывает, что при таких малых изменениях что-либо заметить очень трудно. Но если измерять точно или производить измерения на сильно различающихся высотах, то влияние изменения поля тяжести станет заметно. Так, например, на высоте 10 км часы идут быстрее, чем на поверхности Земли, примерно на одну десятиллиардную часть. Секунда на вершине Эвереста почти на одну десятиллиардную долю короче, чем у поверхности океана. Сейчас, после изобретения атомных часов, это подтверждено с большой точностью. В 1907 году о таком опыте нельзя было и мечтать. Но Эйнштейн нашел более доступную возможность проверки: он оценил, что часы на поверхности Солнца, из-за огромной силы тяжести, действующей там, должны идти на две миллионные доли медленнее, чем на поверхности Земли. Для проверки предсказания можно использовать в качестве часов атомы и сравнить длину волны света, испускаемого ими на Земле и на Солнце (надо рассчитать и измерить сдвиг спектральных линий атомов на Солнце по отношению к спектральным линиям тех же атомов на Земле). Однако в то время и такое измерение было весьма трудным.

Эйнштейн нашел еще одно следствие, вытекающее из распространения принципа относительности на ускоренные системы и на поле тяготения. Он показал, что в ускоренных системах свет распространяется не по прямой, а по кривой линии, форма которой зависит от ускорения. Значит, луч света должен искривляться и в поле тяжести. Искривление луча света должно подтверждаться изменением хода часов. Раз в различных участках поля тяготения время течет по-разному, то есть часы идут с разной скоростью — быстрее там, где оно мало, и медленнее там, где оно велико, то, измеряя скорость света при помощи этих часов, мы получим различные величины. А раз так, то свет ведет себя в поле тяжести, как в среде, где его скорость зависит от свойств среды. Например, в земной атмосфере, плотность которой изменяется с высотой, изменяется с высотой и скорость света. Ведь она постоянна только в пустоте и при отсутствии поля тяжести.

Таким образом, поле тяжести искривляет лучи света в пустоте так же, как их искривляет изменение плотности неоднородной атмосферы.

Вот второе предсказание, которое следует подтвердить или опровергнуть опытом. Искривление лучей света очень мало. Заметить его в лабораторных экспериментах невозможно.

Эйнштейн поясняет, что полученный им результат является прямым следствием связи между массой и энергией. Но если раньше эта связь была установлена только для инертной массы, то теперь стало ясно, что то же самое справедливо для тяготеющей массы. Энергия обладает не только инерцией, но и весом.

Так был совершен первый шаг. Эйнштейну удалось распространить принцип относительности на системы, испытывающие равномерное прямолинейное ускорение и вскрыть глубокую связь между ускорением и тяготением, неведомую ранее связь между массой и энергией. Ему удалось указать на два очень трудных опыта, способных подтвердить новую точку зрения.

Счастливые годы

Еще два года в Берне, где восемь часов службы в патентном бюро давали ежедневно по восемь часов «безделья». Были еще воскресенья, которые Эйнштейн целиком посвящал

любимой науке. Вот что он сообщает об этом в автобиографических набросках 1955 года: «Из событий научного характера, которые относятся к тем счастливым годам в Берне, я упомяну лишь одно, которое привело к наиболее плодотворной идее в моей жизни. Специальной теории относительности было уже несколько лет, когда возник вопрос: ограничен ли принцип относительности инерциальными системами, то есть системами координат, которые движутся равномерно друг относительно друга? Врожденный инстинкт подсказывает: «Вероятно, нет!» Однако основное положение всей прежней механики — принцип инерции — как будто бы исключает всякое расширение принципа относительности».

Как примирить инстинкт-интуицию с традиционной механикой? Ведь относительно ускоренной системы изолированное от всяких сил тело не движется равномерно и прямолинейно. Это позволяет отличить ускоренную систему от неускоренной. Есть еще опытный факт эквивалентности инертной и тяжелой массы. Возможно, что, комбинируя этот факт с расширенным принципом относительности, удастся создать физическую теорию тяготения, решить задачу, от которой отказался даже Ньютон. Замыслы Эйнштейна были непривычными и казались невероятными. Но к нему в то время уже прислушивались.

Первым, понявшим, что в физике появился новый гений, стал другой гений — Планк. Его поддержали еще несколько ученых. Цюрихский университет захотел иметь Эйнштейна в числе своих профессоров. Но это было невозможно. По старинным правилам стать профессором мог только доцент. А Эйнштейн не был доцентом. Он не был даже ассистентом, патентный эксперт третьего класса, лишь недавно получивший докторскую степень. Все же выход удалось найти. Пусть Эйнштейн пробудет год в должности приват-доцента. Конечно, это не дает средств к жизни. Поэтому он должен совмещать эту должность с прежней работой в патентном ведомстве. Эйнштейн согласился после многих колебаний и без всякой охоты. Он не хотел тратить часы «безделья» на лекции. Но пришлось согласиться. Это был единственный реальный путь к профессоруре. Он совместительствовал целый учебный год.

Летом 1909 года Эйнштейн удостоился первых научных почестей — звания почетного доктора Женевского университета. Но Цюрихский университет избрал его лишь на должность экстраординарного (внештатного) профессора. Оклад такого профессора невысок, и жене Эйнштейна пришлось готовить домашние обеды для студентов, чтобы дополнять бюджет семьи. Экстраординарный профессор в служебные часы читает лекции и занимается со студентами. Часы «безделья» по-прежнему посвящены науке. Из-под его пера одна за другой выходят работы о квантовой природе излучения и квантовой теории теплоемкости. Он решает ряд конкретных задач, относящихся к молекулярному строению вещества. Но он не перестает думать о возможности расширения принципа относительности.

Осенью 1910 года в Пражском университете открылась вакансия ординарного профессора теоретической физики. Ректорат обсуждал возможных кандидатов, советовался с крупными физиками. Планк написал: «Если теория Эйнштейна окажется справедливой, на что я рассчитываю, его следует считать Коперником двадцатого столетия».

16 января 1911 года Эйнштейн, по-видимому впервые, выступил с лекцией о теории относительности перед аудиторией, в которой физики были в меньшинстве. Его доклад на заседании Общества естествоиспытателей в Цюрихе имел название: «Теория относительности». Здесь он впервые знакомит слушателей с поразительным выводом теории: заставив часы проделать длительное путешествие и вернув их на— зад, мы увидим, говорит он, что они отстали от контрольных часов, оставшихся на месте. Более того, «если бы мы поместили живой организм в некий футляр и заставили бы всю эту систему совершить такое же движение вперед и обратно, как описанные выше часы, то можно было бы достичь того, что этот организм после возвращения в исходный пункт из своего сколь угодно далекого путешествия изменился бы как угодно мало, в то время как подобные ему организмы, оставленные в пункте отправления в состоянии покоя, давно уже уступили место новым поколениям. Для движущегося организма длительное время путешествия будет лишь

мгновением, если движение будет происходить со скоростью, близкой к скорости света! Это неизбежное следствие наших исходных принципов, к которым нас приводит опыт».

Так родился знаменитый парадокс близнецов. Парадокс, ибо в соответствии с теорией, которую Эйнштейн изложил в докладе, нельзя отличить движущийся объект от неподвижного, и, казалось бы, каждый из близнецов может считать себя неподвижным и поэтому более взрослым, чем его путешествующий брат. Это, конечно, невозможно. Но Эйнштейн не разъяснил слушателям сути парадокса и не показал, как он устраняется.

Мы тоже отложим это на будущее.

С осени 1911 года Эйнштейн стал профессором в Праге, но еще до того, 21 июня, в редакцию журнала «Аннален дер физик» поступила его статья «О влиянии силы тяжести на распространение света». Она начинается так:

«В работе, опубликованной четыре года назад, мы уже пытались ответить на вопрос, влияет ли тяготение на распространение света. Мы снова возвращаемся к этой теме, так как нас не удовлетворяет прежнее изложение вопроса; кроме того, мы теперь еще раз убедились в том, что один из наиболее важных выводов указанной работы поддается экспериментальной проверке. Оказывается, что лучи, проходящие вблизи Солнца, согласно излагаемой ниже теории, испытывают под влиянием поля тяготения Солнца отклонение, вследствие чего должно произойти кажущееся увеличение углового расстояния между оказавшейся вблизи Солнца неподвижной звездой и самим Солнцем почти на одну угловую секунду. Развитие этих идей привело также к некоторым результатам, относящимся к тяготению».

В этой статье Эйнштейн совершенно ясно излагает свое убеждение в том, что равномерное ускорение эквивалентно действию однородного поля тяжести. Принцип эквивалентности станет важнейшей основой будущей теории. Далее он обстоятельно анализирует «тяжесть энергии», показывая, что тело, приобретая энергию, увеличивает не только свою инерцию, но и вес. А следовательно, свет, как одна из форм энергии, подвергается действию поля тяготения. Затем он вновь рассчитывает сдвиг спектральных линий атомов на поверхности Солнца по отношению к спектральным линиям, наблюдаемым в земных условиях. Результат таков: любые часы на поверхности Солнца должны отставать на 2 миллионных доли секунды за секунду по отношению к часам на Земле. Наконец, он вычисляет отклонение луча света, проходящего мимо Солнца, и получает величину 0,83 дуговой секунды. Он пишет: «Было бы крайне желательно, чтобы астрономы заинтересовались поставленным здесь вопросом даже и в том случае, если бы предыдущие рассуждения казались недостаточно обоснованными или фантастическими».

Еще бы, Эйнштейн предлагает отказаться от принципа постоянства скорости света! От принципа, базирующегося на опыте и положенного им самим в основу теории относительности! Теперь он предлагает принять скорость света за величину, характеризующую поле тяжести. Он вступает на путь, на котором с первых шагов видны величайшие трудности.

Бурелом

Уже в начале следующего года Эйнштейн начинает дальнейшее продвижение по избранному пути. 26 февраля 1912 года в тот же журнал поступает статья «Скорость света и статическое гравитационное поле». В ней Эйнштейн уже не ограничивается изложением идей и простыми расчетами, он берется за дело без скидок на математические трудности и впервые получает дифференциальные уравнения для гравитационного поля. Статья начинается так: «В нашей работе, вышедшей в прошлом году, показано, что из гипотезы о физической эквивалентности ускоренной системы координат полю тяжести следуют выводы, хорошо согласующиеся с результатами теории относительности (теории относительности равномерного движения). Но при этом оказалось, что справедливость одного из основных принципов последней, а именно закона постоянства скорости света, ограничена областями

пространства — времени, в которых постоянен гравитационный потенциал. Несмотря на то, что этот результат исключает всеобщую применимость преобразования Лоренца, он не должен отпугивать от дальнейшего следования по предложенному пути».

И он пускается в путь. Уравнения поля тяжести, полученные в этой работе, не похожи ни на уравнения Максвелла, ни на уравнения Ньютона. В каждый из членов этих уравнений входит скорость света или ее квадрат. Можно сказать, что скорость света характеризует структуру гравитационного поля. В свою очередь, гравитационное поле определяет величину скорости света. Это выглядит очень сложно и совсем непривычно, но дает логичные результаты. Если поле тяжести очень слабо, то результаты новой теории переходят в результаты прежней теории относительности. Эйнштейн называет ее «обычной теорией относительности», ибо название для новой теории еще не найдено, а ведь она тоже теория относительности. Работа заканчивается оптимистическим заключением, в котором, однако, не скрываются предстоящие трудности:

«Нам кажется, что проблеме пространства — времени надо ставить следующим образом. Если ограничиться областью постоянного гравитационного потенциала, то законы природы принимают чрезвычайно простую и инвариантную (неизменную. — И. Р.) форму по отношению ко множеству пространственно-временных систем, связанных друг с другом преобразованием Лоренца с постоянной c . Если же не ограничиваться областями, где c постоянно, то множество эквивалентных систем, равно как и множество преобразований, оставляющих законы природы неизменными, станет более обширным, однако эти законы станут более сложными».

Никто не знает, какую драму переживал Эйнштейн между 26 февраля и 23 марта 1912 года, когда в редакцию того же журнала поступила его очередная статья «К теории статического гравитационного поля». Здесь он, исходя из уравнения для гравитационного поля, получает уравнения электромагнитного поля и снова рассматривает связь термодинамических величин с гравитационным полем. Результаты получаются совершенно осмысленными и хорошо согласующимися с обычной теорией.

Трудности начинаются при изучении уравнений поля тяготения. В случае, когда в этом поле присутствует вещество. Сравнительно простой расчет показывает, что в этом случае нарушается закон равенства действия и противодействия, один из фундаментальных законов механики, установленный еще Ньютоном.

Эйнштейн пишет: «Таким образом, мы пришли к довольно рискованному результату, который может вызвать сомнения в справедливости всей развитой здесь теории. Этот результат, очевидно, свидетельствует о глубоких пробелах в основах наших исследований...»

Эйнштейн не скрывает от читателя своих затруднений, более того, он описывает неудачные попытки их преодоления. Единственный легкий путь, позволяющий согласовать уравнения поля тяготения с законом равенства действия и противодействия, требует дальнейшего усложнения уравнений, но этот путь одновременно принуждает к отказу от принципа эквивалентности ускорения и тяготения. Эйнштейн не может пойти по этому пути. Он считает принцип эквивалентности столь важным и так хорошо обоснованным всей совокупностью опытных фактов, что не может отказаться от него. Ведь в нем заложена плодотворная идея, идея о глубокой общности между системой, движущейся ускоренно под влиянием постоянной силы, и неподвижной системой, находящейся в однородном поле тяготения.

Эйнштейн видит только один путь согласования уравнений поля тяготения с принципом эквивалентности. Следует учесть, что принцип эквивалентности опирается только на опыты, проведенные на Земле, где поле тяготения сравнительно невелико. Поэтому он делает шаг назад и сохраняет принцип эквивалентности только для бесконечно слабых полей и бесконечно малых ускорений. «На этот шаг тяжело решиться...» Однако другого пути не видно.

Но и теперь проблема тяготения сводится к сложной математической задаче. Ее

следует решить несмотря ни на что. Путь к решению, возможно, сможет быть найден при помощи математической обработки прежней теории относительности, проведенной польским математиком Минковским. Он придал уравнениям, первоначально найденным Эйнштейном, очень симметричную форму, объединив обычное пространство и время в математическое четырехмерное «пространство — время».

Очень интересно интерпретирует этот подход Луи де Бройль. Он пишет: «Каждый наблюдатель по-своему выкраивает из четырехмерного мира свое пространство и свое время, и формулы преобразований Лоренца немедленно следуют из того, что два по-разному равномерно движущихся наблюдателя разными способами отделяют пространство от времени».

Новый взгляд объединяет временную координату и пространственные координаты в единый четырехмерный мир. Этот новый мир — математическое отражение сложной связи времени и пространства, которое возникает в воображении Эйнштейна как возможная модель Вселенной.

«Отныне пространство само по себе и время само по себе обратились в простые тени, и только какое-то единство их обоих сохранит независимую реальность», — говорит Минковский.

Перед ним, математиком, — чисто формальная, математическая задача. Но Эйнштейн всегда и во всем хочет видеть и физическую картину событий. Следует принять, что реальный мир имеет не трехмерную, а четырехмерную структуру. Она остается неизменной, как оставалась неизменной трехмерная структура предмета в мире классической физики. Для Лоренца трехмерный предмет испытывал при движении сквозь эфир реальное сокращение. Эйнштейн же видит неизменным четырехмерный предмет. Трехмерная его сущность в пространственных координатах и одномерная во временной координате могут меняться, но четырехмерный корабль в четырехмерном мире «пространства — времени» неизменен. Четырехмерная сущность предметов абсолютна и неизменна. Таково кредо новой теории относительности.

Как движется такое тело в новом четырехмерном мире?

Еще один отрывок из автобиографических набросков Эйнштейна: «С этой задачей в голове я навестил в 1912 году моего старого студенческого друга Марселя Гроссмана... Вышло так, что хотя он охотно согласился совместно работать над проблемой, но все-таки с тем ограничением, что он не берет на себя никакой ответственности за какие-либо физические утверждения и интерпретации. Он тщательно просмотрел литературу и скоро обнаружил, что указанная математическая проблема уже решена, прежде всего Риманом, Риччи и Леви-Чивитой».

Приступив вместе с Гроссманом к интенсивной математической разработке новой теории, Эйнштейн нашел время для того, чтобы решить весьма важный в принципиальном отношении вопрос. Он сформулировал этот вопрос так: существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электромагнитной индукции? Ему было ясно из общих, чисто интуитивных соображений, что ответ должен быть положительным. Индукция есть свойство поля. Если верна теория гравитационного поля, она должна содержать такое воздействие. Эйнштейн проводит приближенное решение частной задачи: тяжелое тело расположено внутри полый массивной оболочки, но не имеет с нею никаких связей, кроме гравитационного взаимодействия. Оболочке придают ускоренное движение. Спрашивается: возникнет ли при этом сила, вызывающая ускорение внутреннего тела? Уравнения дают ответ: да, возникнет. Более того, уравнения говорят, что наличие массивной оболочки приводит к тому, что инертная масса внутреннего тела увеличивается.

«Этот результат очень интересен, — пишет Эйнштейн и продолжает: — Это наводит на мысль о том, что инерция материальной точки полностью обусловлена воздействием всех остальных масс посредством некоторого рода взаимодействия с ними».

Так впервые появляется возможность создать физическую теорию, объясняющую происхождение инерции. Ведь инерция — свойство тел сохранять свое равномерное и

прямолинейное движение при отсутствии сил, свойство, открытое Галилеем, — оставалась необъясненной и таинственной около трехсот лет! Правда, Мах высказал мысль о том, что инерция обусловлена действием удаленных звезд, но дальше этой гипотезы он не пошел. Эйнштейн раскрыл тайну инерции. Оставалось выразить это языком математики.

Диалог

Два года продолжалась плодотворная совместная работа, основанная на дружбе, сложившейся еще в студенческие годы. Разработка идейных основ и осмысливание физических следствий были обязанностью Эйнштейна. На Гроссмане лежала математика, сложное для непосвященных, но чрезвычайно гармоничное описание свойств пространства и времени, связанных в единое искривленное «пространство— время».

Успех в работе был обусловлен возродившейся привычкой к длительным обсуждениям, при которых математик пытался вскрыть логические неувязки в рассуждениях физика, а физик требовал от математика общих методов, соответствующих усложняющимся задачам физики.

Первым результатом совместных трудов стала статья «Проект общей теории относительности и теории тяготения». Около года труднейшей напряженной работы, и в результате — не теория, а только проект теории. Авторам стало ясно, что предстоит многое сделать и уточнить, но они понимают значение достигнутого и хотят представить это на суд специалистов. Статья, как и сама работа, состоит из двух частей. Физическая часть написана Эйнштейном, математическая — Гроссманом. Вот ее начало.

«Излагаемая теория возникла на основе убеждения, что пропорциональность инертной и тяжелой масс является точным законом природы, который должен находить свое отражение уже в самых основах теоретической физики... Наглядно эту гипотезу можно сформулировать так: наблюдатель, находящийся в закрытом ящике, никоим образом не может установить, покоится ящик в статическом гравитационном поле или же находится в пространстве, свободном от гравитационных полей, но движется с ускорением, вызываемым приложенными к ящику силами (гипотеза эквивалентности)».

Так в науку вошел ящик, ставший потом лифтом, задача которого состояла в том, чтобы поднять человечество к новому, более ясному пониманию законов природы. Без этих мысленных опытов с ящиком, с несуществующим лифтом, никогда не оторвались бы от Земли и не отправились бы в космос настоящие, реальные космические корабли.

Убеждение в пропорциональности тяжелой и инертной масс покоится на чрезвычайно точном фундаментальном исследовании венгерского физика Этвеша. Опыт Этвеша основан на следующем рассуждении. Тело, покоящееся на поверхности Земли, одновременно испытывает действие силы тяжести и центробежной силы, возникающей вследствие вращения Земли. Первая из этих сил пропорциональна весу тела, его «тяжелой массе», вторая — способности тела противиться изменению его скорости — «инертной массе». Следовательно, если пропорциональность инертной и тяжелой масс не соблюдается, то направление равнодействующей этих двух сил, то есть направление кажущейся силы тяжести (вертикальное направление), зависит от физической природы рассматриваемых тел. Этвеш показал, что пропорциональность между инертной и тяжелой массами соблюдается точнее, чем одна двадцатимиллионная доля этих масс.

При распаде радия выделяется так много энергии, что можно наблюдать убыль его массы на $1/1000$ от общей массы. Если бы при этом изменения инертной массы не соответствовали изменениям тяжелой массы, то опыт Этвеша должен был с легкостью обнаружить такое несоответствие. Но этого нет. Такова экспериментальная основа новой теории. Результаты, полученные в первых попытках создания теории гравитации, воспроизводятся Эйнштейном и Гроссманом в новой математической форме. В основу уравнений теории положены тензоры — сложные математические образования, характеризующиеся квадратными таблицами, содержащими 16 элементов. Эти элементы

расположены в некотором подобии шахматной доски: четыре столбца и четыре строки. Во второй части работы даны правила обращения с этими тензорами. Тензоры применены к построению теории, а из теории получен ряд физических следствий. Одно из них (вывод о том, что поле тяжести нельзя описать обычными числовыми величинами — скалярами) оказалось ошибочным и было отвергнуто в примечании, сделанном после завершения работы.

Понимая, сколь трудно, даже для квалифицированных людей, усвоение их новой теории из журнальной статьи, Эйнштейн и Гроссман излагают ее на годичном собрании Швейцарского общества естествоиспытателей, а затем Эйнштейн делает обширный доклад на собрании Общества немецких естествоиспытателей. Здесь он не только сообщает о своих работах, но и сравнивает их с теориями гравитации, созданными к этому времени двумя другими теоретиками — Абрагамом и Нордстремом, и показывает, в чем состоят недостатки их теорий. Основным пороком теорий этих ученых оказалось желание следовать Эйнштейну более преданно, чем следовал себе сам Эйнштейн. Они хотели сохранить постулат о постоянстве скорости света, введенный Эйнштейном при создании первоначальной теории относительности. Теперь Эйнштейн показывает, сколь ограничен путь, которым можно пройти, сохраняя этот постулат. Действительно, теории, основанные на постоянстве скорости света, не противоречат известным опытам, но эти опыты очень ограничены, и поэтому согласие с ними не может служить достаточным основанием для того, чтобы считать теории правильными. Тем более, что они не способны объяснить природу инерции и даже приводят к выводу о том, что инерция данного тела должна уменьшаться, когда к нему приближаются другие тела. Этот вывод не может быть еще опровергнут опытом, но он выглядит крайне противоестественным.

Эйнштейн просит слушателей задуматься: оправдана ли попытка обобщения теории относительности, выведения ее за рамки равномерных движений? Отвечая на этот вопрос, он напоминает о мысленном опыте в вагоне поезда, движущегося равномерно, и о принципе относительности равномерного движения, принципе Галилея. И продолжает:

«Однако обычно склонны добавлять: конечно, совсем другое дело, если железнодорожный вагон движется неравномерно; если вагон изменит свою скорость, то пассажир получит толчок, который заставит его почувствовать ускорение вагона. Абстрактно говоря, принцип относительности неравномерного движения не имеет места. Однако это заключение отнюдь не безупречно, ибо еще неясно, должны ли пассажиры вагона обязательно связывать с ускорением вагона толчок, который они почувствовали. Следующий пример показывает, что это заключение преждевременно.

Два физика, А и В, очнувшись от наркотического сна, обнаружили, что они вместе с приборами находятся в закрытом ящике с непрозрачными стенками. Они не имеют никакого представления о том, где расположен ящик или как он движется. Они лишь констатируют, что все тела, помещенные в середину ящика и освобожденные там, падают в одном и том же направлении — скажем, вниз — с одинаковым общим ускорением g . Что могут заключить отсюда физики? А скажут, что ящик спокойно лежит на небесном теле и что направление вниз является направлением к центру этого небесного тела, если последнее шарообразно. Однако В стоит на точке зрения, что ящик, под действием приложенной к нему извне силы, движется равномерно ускоренно вверх с ускорением g ; при этом нет необходимости предполагать близости небесного тела. Существует ли для обоих физиков критерий, с помощью которого они могли бы решить, кто прав? Мы не знаем такого критерия, но нам также неизвестно, может ли такой критерий существовать. Однако точный опыт Этвеша относительно равенства инертной и тяжелой масс говорит все же о том, что такого критерия не существует».

Вывод таков: нужно создать теорию, математические уравнения которой не должны менять своего вида при переходе от равномерного движения к ускоренному. При этом получаются весьма сложные уравнения. Из них вытекает предсказание об искривлении лучей света, проходящих вблизи поверхности Солнца. Это можно проверить во время

солнечного затмения. Эйнштейн напоминает слушателям о том, что ближайшее полное затмение Солнца должно произойти в августе 1914 года. Было бы хорошо использовать эту возможность проверки теории...

Известно, что для проведения наблюдений была организована экспедиция немецких астрономов. Экспедиция прибыла в удобное для наблюдения место на территории России и приступила к подготовке фотографирования солнечного затмения. Но началась первая мировая война. Участники экспедиции были интернированы, и ее работа прекращена.

Не до сострадательных улыбок

Еще до начала войны произошло несколько важных событий в научной и личной жизни Эйнштейна. Он заканчивает и публикует совместно с Гроссманом вторую работу, посвященную математическим свойствам уравнений обобщенной теории относительности, охватывающей теорию тяготения. В заголовке этой статьи впервые применен термин «общая теория относительности». Уравнения этой теории разбиты на две группы существенно различных типов. Первая группа описывает явления в материальных телах — механические, электрические и тепловые явления. Эти уравнения можно рассматривать как обобщение первоначальной теории относительности. Вторая группа описывает гравитационное поле, являющееся продуктом влияния материальных тел. Эти уравнения не имеют аналога в первоначальной теории. Первая группа уравнений не меняет своей формы при любых движениях, вторая остается неизменной только при неускоренных движениях. Причину различия установить не удалось. Но в этой работе авторы смогли доказать, что и вторая группа уравнений может оставаться неизменной при любых ускорениях, если тензор — величина, характеризующая поле тяготения, — будет полностью определяться самими уравнениями. Это было большим достижением, но оно оплачивалось дополнительным усложнением теории, уменьшением ее наглядности.

В личной жизни Эйнштейна с началом 1914 года тоже связан существенный перелом. По инициативе Планка и Нернста его пригласили в Берлин, избрали членом Берлинской академии наук и назначили директором вновь организованного физического института, предоставив ему все возможности для научной работы без обязательства читать лекции и с минимумом административной нагрузки. Эти благоприятные условия побудили его принять приглашение и сменить свободную демократическую Швейцарскую республику на милитаристскую кайзеровскую Германию.

Поначалу условия работы действительно были благоприятными. Эйнштейн испытывал удовлетворение от возможности постоянного общения с Планком, Нернстом и рядом других выдающихся физиков, работавших в Берлине. Уже после начала войны, когда условия работы резко ухудшились, вышла статья Эйнштейна «Формальные основы общей теории относительности». В этой статье, между прочим, впервые появляется название «специальная теория относительности», обозначающее первоначальную теорию, справедливую для специального случая систем, движущихся равномерно и прямолинейно. Систем, в которых действует принцип инерции Галилея. Общая теория относительности не накладывает никаких ограничений на движения физических систем. В основе Общей теории лежит представление о том, что в бесконечно малых областях пространства и времени справедлива Специальная теория. В областях больших размеров — это не так.

Общая теория относительности, изложенная в этой статье, еще далеко не завершена. Неизвестно, насколько эквивалентны в больших областях пространственные направления и изменение времени. В общей теории относительности можно, во всяком случае исходя из формальных соображений, представить себе такое развитие процесса, которое после различных изменений приводит обратно к исходной точке не только в пространстве, но и во времени. Эйнштейн пишет: «Это противоречит коренным образом моей физической интуиции. Однако я не в состоянии привести доказательство того, что возможность появления таких кривых исключена в развитии теории. Так как после такого признания я не

уверен в том, что не вызову на лица читателей сострадательной улыбки, то не могу удержаться от следующего замечания относительно существующего понимания основ физики».

Так Эйнштейн вводит читателя в свою творческую лабораторию, лабораторию теоретика, где нет ничего, кроме бумаги, покрываемой все усложняющейся вязью математических формул. И он не прячет от читателя ни трудностей, ни сомнений, ни ошибок. Он еще раз поясняет читателю основы физики. До Максвелла в физике царствовала механика Ньютона, основанная на евклидовой геометрии и допускавшая дальное действие. Считалось, что силы тяжести мгновенно действуют на любом расстоянии, хотя Ньютон пошел на это с неохотой. Вопрос о том, каким образом они действуют, оставался без ответа. Считалось достаточным описать их действие математическими формулами. Аналогично объясняли взаимодействие электрических зарядов или магнитов. Максвелл устранил дальное действие в сфере электричества и магнетизма. Специальная теория относительности объединила механику Ньютона и электродинамику Максвелла. Однако Евклидова геометрия осталась. Вероятно, это именно та непоследовательность, от которой нужно освободиться. Необходимо уточнить геометрические свойства природы, возможно, таким путем удастся избавиться от дального действия в явлении тяготения. Требуется создать теорию гравитационного поля.

Таков краткий обзор физических основ и собственных работ Эйнштейна, выполненных с 1907 по 1914 год в области теории относительности. Он хотел уяснить себе и сообщить другим, что, по существу, было им достигнуто.

Следующая статья была направлена в печать лишь в ноябре 1915 года, она начинается с суровой критики предыдущих работ.

«В последние годы я старался построить общую теорию относительности, исходя из относительности также и неравномерных движений. Я думал, что на самом деле нашел единственный закон гравитации, который соответствует понятному по смыслу общему постулату относительности, и пытался доказать необходимость именно этого решения в работе, появившейся в прошлом году в этом журнале. Однако заново проведенный анализ показал, что, следуя по предложенному пути, совершенно невозможно ничего доказать; то, что это казалось все же сделанным, было основано на заблуждении».

И далее: «По этим причинам я полностью потерял доверие к полученным мной уравнениям поля и стал искать путь, который бы ограничивал возможности естественным образом. Так я вернулся к требованию более общей ковариантности (неизменности) уравнений поля, от которой я отказался с тяжелым сердцем, когда работал вместе с моим другом Гроссманом». Все же он опять полон оптимизма: «Прелесть этой теории едва ли может скрыться от того, кто действительно понимает ее». Через неделю он посылает в журнал добавление к предыдущей работе. «В недавно появившемся исследовании я показал, как можно построить теорию гравитационного поля на основе римановской ко-вариантной теории многомерных многообразий. Здесь будет показано, что путем введения довольно смелой дополнительной гипотезы о структуре материи может быть достигнуто еще более стройное логическое построение теории».

Эта гипотеза сводится к предположению о том, что гравитационное поле является существенной составной частью материи! Уравнения показывают, что гравитационное поле вблизи больших масс должно описываться неевклидовой геометрией. Вблизи больших масс само пространство оказывается искривленным... Так Эйнштейн совершенно по-новому объяснил сущность тяготения. Нет, тяготение — не просто сила. Массивное тело не притягивает другое ньютоновскими силами дального действия. Оно искривляет «пространство — время» вокруг себя. Чем ближе к массивному небесному телу, тем больше кривизна окружающего «пространства — времени».

Мы поясним это простым опытом. Возьмите большой обруч. Натяните на него кусок холста. Пусть холст не имеет швов и будет натянут очень туго. Обруч должен лежать строго горизонтально. Положите на холст очень маленький шарик. Толкая шарик, мы увидим, что

он катится одинаково во всех направлениях. Шарик весит так мало, что прогибанием холста под ним мы пренебрегаем. Трением о холст и воздух тоже. Мы должны помнить: Галилей учил, что необходимо пренебрегать второстепенным, чтобы усмотреть и понять главное.

Наш обруч с холстом — двумерная модель трехмерного пространства. Мы должны забыть о том, что есть «верх» и «низ». Здесь имеет смысл только плоская поверхность холста, на которой справедлива геометрия Евклида. После толчка шарик, свободный от действия сил, перемещается по инерции в направлении толчка. Если толчка нет, шарик неподвижен в любой точке этой евклидовой поверхности.

Положим теперь в центр холста бильярдный или крокетный шар. Поверхность холста прогнется. Геометрия на ней станет неевклидовой, сумма углов треугольников перестанет быть равной двум прямым углам. На этой неевклидовой поверхности маленький шарик уже не сможет оставаться неподвижным. Он будет неизбежно и «самопроизвольно» скатываться к центру, туда, где лежит тяжелый шар. Все выглядит так, как будто тяжелый шар притягивает его. Но притяжение тут ни при чем. Можно обойтись без тяжелого шара и прогнуть холст, нажимая в его центр тонкой палочкой. Важно возникновение кривизны этого «двухмерного пространства», двумерной кривой поверхности. Именно это искривление, эта неевклидовость приводит к тому, что свободные маленькие шарики падают к центру кривизны, следуя по геодезическим линиям этой поверхности. А роль тяжелого шара или палочки сводится к искривлению ранее плоской (евклидовой) поверхности. Усилие руки, нажимающей на палочку, полностью заменяет притяжение тяжелого шара к Земле. Правда, без гравитационного поля Земли наша модель не работает. Оно помогает моделировать силу, порождаемую кривизной пространства. Но то, что это поле играет вспомогательную роль, легко показать, подперев тяжелый шар снизу сквозь холст, чтобы холст снова стал плоским. Неевклидовы свойства исчезнут, и шарик будет спокойно лежать в любой точке или двигаться по инерции по прямым линиям, если его толкнуть, хотя поле Земли не исчезло.

Папа, почему ты так знаменит?

Теперь, дорогой читатель, немного внимания, ибо сейчас наша модель позволит нам уподобиться богу Ньютона, за которым этот гений оставил в механике только право первого толчка. Вынем опору из-под центрального шара. Холст снова приобретет кривизну, станет двумерным неевклидовым пространством. Толкнем теперь лежащий на холсте маленький шарик. Если толчок не направлен к центру холста, то шарик начнет двигаться по сворачивающейся спирали, постепенно приближаясь к центру. Галилей, несомненно, узнал бы в этой спирали эллипс, искаженный трением, постепенно поглощающим энергию, сообщенную шарiku нашим толчком. Форма и направление осей эллипса зависят от величины и направления скорости, первоначально сообщенной шарiku. При особом старании можно добиться того, что спираль будет состоять как бы из постепенно уменьшающихся окружностей. Все зависит от того, каким был первый толчок.

Так мы смоделировали движение планеты вокруг Солнца. Инерция мешает планете круто повернуть и упасть на Солнце. Кривизна пространства, вызванная присутствием массы Солнца, превращает движение по инерции в движение по эллипсу. В течение миллиардов лет трение планеты о космическую пыль и газы, а также приливное трение в веществе Солнца приводят к тому, что движение происходит не точно по эллипсу, а по спирали, очень медленно и постепенно приближающей планету к Солнцу.

Ньютон понял и объяснил людям, как движутся планеты, при этом он пользовался законами механики и геометрией Евклида. Вопрос о том, почему они так движутся, он оставил потомкам. Эйнштейн понял и это. Огромная масса Солнца придает окружающему пространству свойства, описываемые неевклидовой геометрией. На малых расстояниях, в опытах на Земле это остается незамеченным. В масштабах Солнечной системы это можно обнаружить. Эллипс в трехмерном пространстве, составляющем элемент четырехмерного неевклидова «пространства — времени», является пространственным отображением

геодезической линии этого «пространства — времени», по которым движутся тела, свободные от действия сил. (Силы тяготения в ньютоновском смысле как реальной дальнедействующей силы в действительности не существует. Массивное тело искажает геометрию «пространства — времени», делая ее неевклидовой. Оно образует поле тяготения, а не притягивает к себе другие тела непосредственно.)

Возможности модели, которой мы здесь воспользовались, далеко не исчерпаны. В этой книге мы прибегнем к ней еще дважды. А пока возвратимся к нашему повествованию.

Но прежде чем идти дальше, необходимо сделать еще одно замечание. Мы, приводя шарик в движение, не только присвоили себе право первого толчка, предоставленное Ньютоном богу, но и совершили «чудо», обсуждая наш опыт так, как будто мы смотрим на поверхность холста сверху. Но ведь мы с самого начала условились, что в нашем опыте нет «верха» и «низа». Существует только двухмерная поверхность холста, плоская или искривленная, соответственно евклидова или неевклидова, и ничего более. Мы должны были бы обсуждать опыт с точки зрения двухмерного плоского существа, для которого не существует самих понятий «верх» и «низ». По холсту должен был двигаться не шарик, а этаким плоский живой листок, скользящий по инерции в евклидовом мире по прямым, а в неевклидовом по геодезическим линиям. И сам плоский листок должен был бы наблюдать свое движение и сообщать нам о результатах опыта. В неевклидовом мире на искривленной к центру поверхности это плоское существо испытывает гравитационное притяжение к центру кривизны. Читатель сам может перевести весь опыт на язык этого плоского существа, вместо того чтобы взирая на него из несуществующего для этого существа трехмерного мира.

Эйнштейн нигде не описал такого опыта. Однако, вероятно, имел в виду нечто подобное, когда отвечал на вопрос своего малолетнего сына: «Папа, почему ты, собственно, так знаменит?» Он сказал: «Видишь ли, когда слепой жук ползет по поверхности шара, он не замечает, что пройденный им путь изогнут, мне же посчастливилось заметить это».

Теория относительности заменила тяготение геометрическим искривлением «пространства — времени», но в 1915 году, когда Эйнштейн писал обсуждаемую сейчас статью, эта теория еще не ответила на многие вопросы. Мгновенно ли возникает это искривление «пространства — времени», или оно расходится подобно волнам? Это были вопросы без ответов, хотя высказывались интересные и курьезные гипотезы...

Железная необходимость перемен

Не прошло и двух недель, как новый вариант теории принес первые плоды. Он показал, что ожидаемое искривление луча света, проходящего вблизи Солнца, должно быть вдвое большим, чем давали прежние расчеты, которые еще не учитывали кривизну пространства вблизи больших масс, а опирались только на то, что фотоны обладают массой. Однако это уточнение казалось мелочью по сравнению со вторым результатом.

Прежние уравнения общей теории относительности переходили в пределе в уравнения механики Ньютона и давали, как следствие, законы Кеплера, описывающие движения планет. Новые уравнения предложили совершенно неожиданную, хотя и малую, поправку к самому закону движения планет. Для всех планет эта поправка столь мала, что в то время ее невозможно было проверить. Для всех планет, кроме Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты.

Для Меркурия еще Леверье открыл удивительную аномалию. Меркурий, в отличие от остальных планет, не движется по эллипсу. Его орбита очень близка к эллипсу. Это как бы эллипс, который медленно вращается вокруг Солнца, проходя около 45 дуговых секунд за столетие. В результате Меркурий описывает в пространстве сложную розетку. Астрономы надежно установили, каково истинное движение планеты, хотя никто не мог указать причину несовпадения движения Меркурия с законами механики Ньютона. Высказывались различные гипотезы, например, предполагалось, что между Меркурием и Солнцем существует еще одна

планета, увидеть которую мешает яркий солнечный свет. Известны и другие столь же необоснованные гипотезы.

Теперь новые уравнения гравитационного поля привели к поправке в законе Кеплера, соответствующей наблюдаемому движению орбиты Меркурия с погрешностью, не превышающей одного процента. (В 1915 году движение орбиты Меркурия было измерено менее точно, чем теперь. Исходя из тех данных различие между вычислением Эйнштейна и данными астрономов составило 5 %, но и это было триумфом.)

Наконец 2 декабря 1915 года в редакцию прибывает короткая итоговая статья. В ней впервые в окончательной форме выписаны уравнения теории тяготения. Она фиксирует мнение автора: «Наконец завершено построение общей теории относительности как логической схемы. Постулат относительности в его наиболее общей форме... приводит с железной необходимостью к вполне определенной теории тяготения, объясняющей движение перигелия Меркурия».

Добавим еще, что эта статья обогатила лабораторный жаргон физиков выражением «железная необходимость», породившим затем «железную теорию», «железный вывод» и просто энергичное «железно», которым физики склонны фиксировать свои успехи и подкреплять свои аргументы в научных дискуссиях.

Несмотря на то что Эйнштейн написал выше приведенные слова о завершении общей теории относительности до 2 декабря 1915 года, ее возникновение обычно относят к следующему году. Если принять эту традицию, то днем ее рождения следует считать 20 марта 1916 года, когда в редакцию журнала «Аннален дер физик» поступила большая статья «Основы общей теории относительности». Многолетний труд наконец завершен. Эйнштейн пишет: «Моя главная цель — изложить эту теорию так, чтобы читатель ощутил психологическую естественность выбранного пути и чтобы предпосылки, положенные в ее основу, представлялись бы как можно лучше согласованными с опытом».

Читатель уже, несомненно, освоился с идейными основами и главными результатами общей теории относительности. Но ее автор считал необходимым еще и еще раз повторять и уточнять их формулировки. Это сделано и в новой статье. Проведено наиболее полно и последовательно. Завершено наиболее радикальное обобщение специальной теории относительности, ограниченной случаем равномерных и прямолинейных движений. Теперь стало ясно, что законы физики должны записываться такими математическими формулами, которые остаются справедливыми и неизменными при любых движениях и учитывают влияние материи на структуру четырехмерного «пространства — времени». Именно такие математические формулы составляют плоть монументального творения Эйнштейна — общей теории относительности. Это, в конечном итоге, вытекает из принципа причинности. В науке нет места фиктивным причинам, придумываемым для объяснения того или иного явления. В качестве причин и следствий наука может признавать только наблюдаемые факты. Механика Ньютона не удовлетворяет этому требованию. Ее абсолютное пространство, абсолютное время, абсолютный покой и абсолютное движение по отношению к абсолютно неподвижному пространству являются фикциями и должны быть устранены из науки.

Главные экспериментальные факты, оставшиеся неучтенными и необъясненными в специальной теории относительности (и конечно, лежащие за пределами механики Ньютона), — это существование сил инерции и равенство инертной и тяжелой масс. Эти факты лежат в основе общей теории относительности, центральной частью которой является теория тяготения.

Теория вышла за пределы лифта, ящика, движущегося прямолинейно с постоянным ускорением. Теперь снято и принятое вначале ограничение однородными полями тяготения. Они могут быть любыми, но всегда полностью определяются материей, присутствующей во Вселенной, и энергией, наполняющей ее, ибо энергия тоже обладает свойством тяготения. Окончательные уравнения теории справедливы при любых движениях и при любых распределениях массивных тел и полей. Более того, это требование распространено на все

законы природы. По этому признаку, по неизменности математических формул при любых движениях и полях можно опознавать правильные формулировки законов природы и отбрасывать ошибочные, не дожидаясь их проверки опытом.

Все известные физические теории могут быть приведены в соответствие с общей теорией относительности. Все их предсказания сохраняют силу. Ни один из известных опытных фактов не противоречит этой теории. Вдали от больших масс и при отсутствии ускорений формулы, учитывающие общий принцип относительности, переходят в формулы прежних теорий.

Общая теория относительности объяснила аномалию движения планеты Меркурий. Она предсказала, что часы на поверхности Солнца идут медленнее, чем на Земле, а часы, расположенные на краю вращающегося диска, идут медленнее, чем часы, расположенные вблизи его центра. Из теории следует, что луч света притягивается к Солнцу и искривляется им. Это, конечно, справедливо и для других больших масс.

Все предсказания общей теории относительности были впоследствии подтверждены опытом. Так классическая физика достигла высшего единства своих основ, предельной согласованности своих результатов. Однако дальнейшее развитие теории не прекратилось. Оно продолжается и в наши дни в полном соответствии с положением о безграничности процесса познания.

ЧАСЫ БЛИЗНЕЦОВ

Оставим изящество портным и сапожникам

Величайшее творение мысли, порожденное одним человеком, — общая теория относительности с трудом пробивалась в сознание ученых, а тем более в сознание широких масс. Математиков она не заинтересовала, ибо содержала уже освоенные математические методы. Физиков отпугивала сложная математика, которой оперировала новая теория. Большинство физиков того времени не владело тензорным исчислением и методами неевклидовой геометрии, служившими ее математической основой. Остальные просто не знали о ней и не представляли, каково ее значение для науки и судеб человечества. Впрочем, и сам Эйнштейн не подозревал в то время, что он открыл путь к овладению ядерной энергией, к созданию нового ужасного оружия. Может быть, отчасти, невнимание к новой теории объяснялось и влиянием мировой войны. Война вызвала взрыв шовинизма в Германии. Пацифистская позиция Эйнштейна была одной из причин враждебности к нему и его работам на родине. По другую сторону фронта он был немцем, его работы публиковали только немецкие журналы. Это сужало круг людей, желавших и способных ознакомиться с его идеями.

Лишь через три года произошел перелом. В 1919 году снова ожидалось полное солнечное затмение. Побежденная, голодная Германия не могла и думать о дорогостоящей экспедиции, способной проверить предсказания теории относительности. Экспедиция, направленная с этой целью в Россию в 1914 году, была, как известно, интернирована в начале войны и не выполнила свою задачу. Английские ученые подхватили эстафету. Эддингтон начал думать о такой возможности еще весной 1917 года. Неизвестно, был ли он в это время уже знаком с общей теорией относительности или исходил из первых предположений и оценок, опубликованных Эйнштейном в довоенные годы.

Эддингтон готовил экспедицию из двух частей. Одна должна была проводить фотографирование во время полной фазы затмения на острове Принчипе в Гвинейском заливе у побережья Африки, другая в деревне Собрель в Бразилии. Сам Эддингтон работал на острове Принчипе и наблюдал ход затмения через набегавшие дождевые тучи. В течение большей части полной фазы затмения видимость здесь была плохой. Иногда, сквозь разрывы туч, удавалось заметить солнечную корону, но главная цель — фотографирование звезд —

казалась невыполнимой. Напряженное ожидание становилось невыносимым. Расчетные минуты и секунды полной фазы пролетали, унося надежды на успех. Произвести фотографирование удалось лишь незадолго до окончания полной фазы затмения. В Бразилии небо было безоблачным. Часть фотографий оказалась безупречной, другие содержали искажения из-за нагревания приборов солнечными лучами.

Затмение состоялось 29 мая 1919 года. Обработка фотографий, их сравнение с полученными заранее фотографиями той же части неба, но в отсутствие Солнца — долгий и кропотливый процесс. Пока Эддингтон готовится сообщить о результатах наблюдений, возвратимся к нашей модели — к обручу, натянутому холстом. Но теперь заменим холст прозрачной пленкой. Натянем ее так же туго, как прежде был натянут холст. Эта пленка, кроме своей прозрачности, должна обладать двумя свойствами. Во-первых, она должна слегка, рассеивать свет. Благодаря этому луч света, идущий внутри пленки, становится видимым со стороны. Во-вторых, материал пленки должен быть выбран таким, чтобы его плотность увеличивалась при изгибании пленки, причем увеличивалась тем сильнее, чем круче изгиб. Такие прозрачные вещества действительно существуют.

Все готово к мысленному опыту. Пленка натянута. Ее поверхность плоская. На ней справедлива геометрия Евклида. Пустим внутрь пленки через ее торец луч света. Куда бы мы ни направляли его, он будет оставаться прямым, как надлежит лучу света в евклидовом пространстве.

Положим теперь в центр пленки тяжелый шар. Пленка изогнется, причем изгиб будет наиболее крутым вблизи шара, переходя в пологий конус по мере приближения к обручу. Это значит, что плотность пленки, а следовательно, и ее показатель преломления, определяющий скорость света внутри вещества, будут возрастать от периферии к центру. Теперь вспомним, что в более плотных средах скорость света меньше, чем в менее плотных. Значит, скорость света вблизи центра пленки окажется меньшей, чем около обруча, причем это изменение будет определяться изменением кривизны пленки.

Вот он, решающий момент! Направив луч света внутрь пленки так, чтобы он прошел вблизи шара, лежащего в ее центре, мы увидим, что луч света искривится в сторону шара. Луч света, этот символ прямизны, изогнулся под влиянием кривизны поверхности — поверхности, для которой теперь справедлива неевклидова геометрия. Так же выглядел и луч света, проходящий от удаленной звезды мимо Солнца в прибор Эддингтона во время солнечного затмения. Его искривление очень мало. Измерение этого искривления связано с большими трудностями. Наблюдать такое явление непосредственно в лаборатории совершенно невозможно. Поэтому мы прибегли к модели, в которой отклонение луча света усилено благодаря свойствам пленки, резко изменяющимися при ее переходе от плоской поверхности к криволинейной — неевклидовой — поверхности.

Лишь в сентябре кропотливая работа экспедиции была закончена. Эддингтон сообщил о полученных результатах Лоренцу. Лоренц 22 сентября телеграфировал Эйнштейну. 27 сентября Эйнштейн написал своей матери: «Сегодня хорошие новости! Лоренц телеграфировал мне, что британская экспедиция действительно доказала смещение света вблизи Солнца». Почти столь же кратко он сообщил об этом своим коллегам. 9 октября 1919 года редакция журнала «Натурвиссеншафтен» («Науки о природе») зарегистрировала его заметку под названием «Доказательство общей теории относительности». Вот ее текст:

«Согласно телеграмме, посланной проф. Лоренцом автору этих строк, английская экспедиция под руководством Эддингтона, направленная для наблюдения за солнечным затмением 29 мая, обнаружила отклонение света на краю солнечного диска, требуемое общей теорией относительности. По предварительной оценке наблюденное значение между 0,9 и 1,8 дуговой секунды. Теория требует 1,7 секунды».

Эддингтон официально доложил о полученных результатах 6 ноября на совместном заседании Королевского общества и Королевского астрономического общества. Открывая заседание, президент Королевского общества Дж. Дж. Томсон сказал: «Это не открытие отдельного острова, а целого континента новых научных идей. Это величайшее открытие со

времен Ньютона».

Газеты разнесли новость по всему свету — ее восприняли так, как будто бы она относилась не к подтверждению предельно отвлеченной научной теории, а была важнейшим политическим событием или касалась личной жизни кинозвезды. Эйнштейн стал знаменит. Его слава затмила известность генералов и политиков, писателей и актеров. Его теорией и его взглядами интересовались миллионы. Но существо теории относительности оставалось доступным лишь немногим. Рассказывают, что однажды Эддингтона спросили: правда ли, что теорию относительности понимают лишь три человека? Когда собеседник заметил странную задумчивость Эддингтона и начал уверять его, что не сомневается в том, что Эддингтон является вторым из них, тот признался, что не может сообразить, кто же третий...

Популярные книги о теории относительности расходились огромными тиражами. Вероятно, люди, уставшие от тревог и лишений военных лет, хотели найти в науке опору и уверенность в будущем. Лучшей из популярных книг, посвященных этой труднейшей области, и сейчас является небольшая книга «О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение)», написанная ее создателем в 1916 году, в год опубликования общей теории относительности. В предисловии к ней сказано:

«Настоящая книга имеет целью дать возможно точное представление о теории относительности читателям, интересующимся этой теорией с общенаучной, философской точки зрения, но не владеющим математическим аппаратом теоретической физики. Предполагается, что читатель имеет общеобразовательную подготовку, а также достаточно терпения и силы воли. Автор приложил много усилий для того, чтобы достигнуть по возможности более ясного и простого изложения основных мыслей в той последовательности и связи, в какой они фактически возникали. В интересах ясности оказались неизбежными повторения; пришлось отказаться от стремления к изящности изложения: я твердо придерживался рецепта гениального теоретика Больцмана — оставить изящество портным и сапожникам. Я, по-видимому, не утаил от читателя трудности, лежащие в основах теории. Эмпирические физические основы теории изложены очень кратко, чтобы читатель, близко не соприкасающийся с физикой, не оказался в положении путника, который из-за деревьев не видит леса. Пусть чтение этой книги доставит читателю несколько радостных часов.

Декабрь 1916 г. А. Эйнштейн».

Это предисловие приведено здесь полностью для того, чтобы побудить читателя отыскать книгу и постараться самому вкусить несколько радостных часов.

Ошибка Жюль Верна

Общая теория относительности возникла как ответ на вопрос: чем ускоренное движение отличается от движения по инерции. Вот что пишет по этому поводу создатель теории относительности:

«Представим себе обширную область пустого мирового пространства, настолько удаленную от звезд и больших масс, что со значительной степенью точности осуществляется случай, предусмотренный основным законом Галилея (законом инерции). Тогда для этой части мира можно выбрать галилеевское тело отсчета, относительно которого покоящиеся точки остаются в покое, а движущиеся — в состоянии прямолинейного и равномерного движения. В качестве тела отсчета представим себе обширный ящик в виде комнаты; в нем находится наблюдатель, снабженный необходимыми приборами. Для него, естественно, тяжесть не существует. Он должен прикрепить себя к полу веревками, чтобы от малейшего удара о пол не всплыть медленно к потолку комнаты».

В отличие от первых, да и многих последующих читателей книги Эйнштейна, нам не трудно представить себе ощущения и заключения его гипотетического наблюдателя. Ведь мы много раз видели по телевизору, как свободно парят в невесомости космонавты. Для них тяжесть не существует, хотя они и летят вблизи Земли. Они не испытывают силы земного

тяготения именно потому, что свободно летят по инерции по орбите вокруг Земли или, как это было в экспедициях «Аполлон», по орбите Земля — Луна или обратно. Человек и приборы не испытывают силы тяжести, если они свободно летят в поле тяжести. Это было задолго до космических полетов ясно Эйнштейну. Этого не понимал Жюль Верн, автор знаменитого романа «Из пушки на Луну», герои которого испытывали силу тяжести в течение всего полета за исключением небольшого участка, где, по мнению Жюль Верна, притяжение Луны уравнивает притяжение Земли. При всей своей эрудиции знаменитый фантаст допустил ошибку — невесомость наступает сразу после выключения двигателя. В романе это должно было произойти, когда снаряд покинул ствол орудия.

Но предоставим снова слово Эйнштейну: «Пусть в центре крышки ящика с наружной стороны прикреплен трос, за который какое-то существо начинает тянуть ящик с постоянной силой. Тогда ящик с наблюдателем будет двигаться равномерно ускоренно «вверх». Его скорость с течением времени будет возрастать до фантастической величины, если наблюдать с другого тела отсчета, которое никто не тянет.

Как же судит об этом явлении человек, находящийся в ящике? Ускорение ящика передается ему давлением со стороны пола. Следовательно, он будет воспринимать это давление своими ногами, если только не захочет прийти в соприкосновение с полом всем своим телом. При этом он стоит в ящике совершенно так же, как и в комнате своего дома на Земле. Если он выпускает из рук некоторое тело, то этому телу уже не будет передаваться ускорение ящика; поэтому оно будет приближаться к полу с ускорением относительно последнего. Далее наблюдатель убедится, что ускорение тела относительно пола ящика всегда одинаково, с каким бы телом ни производился опыт. Итак, человек в ящике, основываясь на своих сведениях о поле тяжести... придет к выводу о том, что он вместе с ящиком находится в постоянном во времени поле тяжести. Правда, какое-то время он будет удивлен тем, что сам ящик не падает в этом поле тяжести. Но затем он обнаружит в центре крышки крюк с прикрепленным к нему натянутым тросом и придет к выводу, что ящик подвешен и покоится в поле тяжести. Можем ли мы посмеяться над этим человеком и сказать, что его предположение ошибочно? Думаю, что мы не вправе поступить так, если хотим оставаться последовательными; мы должны также признать, что его предположение не содержит ни логических противоречий, ни противоречий с известным законом механики. Мы можем рассматривать ящик покоящимся, если даже он движется ускоренно относительно упомянутого выше «галилеевского пространства». Следовательно, мы имеем достаточно точное основание распространить принцип относительности на тела отсчета, движущиеся ускоренно одно относительно другого; таким путем мы получаем сильный аргумент в пользу обобщенного постулата относительности».

Иными словами, принцип относительности должен быть применим не только к телам, движущимся по инерции, но и к ускоряемым телам. Но мысленный опыт продолжается.

«Пусть человек в ящике прикрепил внутри ящика к его крышке веревку и к свободному концу ее привязал какое-либо тело. Под действием последнего веревка будет натянута в «вертикальном» направлении. Мы ставим вопрос о причине натяжения веревки. Человек в ящике скажет: «Подвешенное тело испытывает действие силы тяжести, направленной вниз и уравновешенной натяжением веревки; то, чем определяется натяжение веревки, это тяжелая масса подвешенного тела». Но с другой стороны, наблюдатель, который свободно парит в пространстве, так объяснит натяжение веревки: «Веревка ускоренно движется вместе с ящиком и передает это ускорение прикрепленному к нему телу. Величина натяжения веревки такова, что она сообщает данное ускорение телу. Величина натяжения веревки определяется инертной массой тела». Из этого примера видно, что из нашего обобщения принципа относительности с необходимостью следует положение о равенстве инертной и весомой масс. Тем самым мы получаем физическую интерпретацию этого положения».

Так общая теория относительности впервые объясняет таинственный факт равенства инертной и тяжелой масс. Это равенство есть простое следствие того, что действие однородного поля тяжести неотличимо от действия постоянного прямолинейного ускорения.

Это не значит, будто бы соответствующим выбором ускорения можно заменить любое поле тяжести. Но об этом позже.

Различие между движением по инерции и ускоренным движением было ясно уже Ньютону. Но он не мог найти причину такого различия и оставил эту проблему нерешенной. Общая теория относительности приводит к нескольким радикальным следствиям, которые долго казались невероятными тем, кто уже свыкся со специальной теорией относительности, или тем более тем, кто остался на уровне механики Ньютона. Общая теория относительности отвергает не только абсолютный покой в пространстве, принятый в механике Ньютона, но лишает пространство свойств, соответствующих геометрии Евклида. Геометрия Евклида, как и механика Ньютона, могут применяться — не приводя к ошибкам — лишь вдали от массивных тел. Вблизи массивных тел евклидова геометрия несправедлива, сумма углов треугольника не равна двум прямым углам. Прямая линия не является кратчайшим расстоянием между двумя точками. Луч света идет не по прямой. Если при расчете траектории света, проходящего вблизи поверхности Солнца, учитывать не только притяжение света Солнцем, но и искривление пространства под действием его массы, отклонение геометрии в этой области пространства от геометрии Евклида, то отклонение луча света от прямой линии будет 1,7 угловых секунды, а не 0,85 угловых секунды, как давал первоначальный расчет, выполненный Эйнштейном в 1907 году. Тогда он учитывал лишь притяжение луча света к Солнцу вследствие того, что энергия имеет вес. Экспедиция Эддингтона, а потом и другие подтвердили вывод общей теории относительности, а с ним и реальность отклонения геометрии пространства вблизи больших масс от геометрии Евклида.

Отвергает ли этим общая теория относительности специальную теорию относительности? Конечно, нет. Общая теория относительности приводит к специальной в областях, достаточно удаленных от больших масс. Здесь простое есть частный случай сложного.

Близнецы-разнолетки

Одно из поразительных откровений Эйнштейна относится к вопросу течения времени. Специальная теория относительности возникла в результате отказа от понятия абсолютной одновременности, присущей механике Ньютона. Вывод о том, что движущиеся часы идут медленнее, чем неподвижные, казался многим чуть ли не мистикой. Они рассуждали так: теория относительности исходит из того, что движение относительно, значит, нельзя отличить, движутся ли данные часы относительно других или другие относительно данных. И далее: значит, данные часы отстают относительно других ровно на столько же, на сколько другие отстают относительно данных. И вывод: этого не может быть; это логическое противоречие. Каждый знает, что если одни часы отстают от других, то другие их опережают. Но еще больше масла в огонь подлил сам Эйнштейн, обративший в 1911 году внимание естествоиспытателей в Цюрихе на то, что не только ход часов, но и темп протекания всех процессов зависит от их движения. Что живой организм, отправленный в далекое путешествие с очень большой скоростью, по возвращении неизбежно окажется моложе, чем его близнец, оставшийся на месте. Скептики не только указывали ему на логические противоречия, но и с полным правом говорили, что на основе всего совокупного опыта человечества это представляется невозможным.

Общая теория относительности не только подтверждает этот парадоксальный вывод специальной теории относительности, но идет дальше. Она показывает, что ход часов зависит не только от скорости, но и от потенциала поля тяжести, в котором находятся часы, это относится и к любым другим процессам. Часы на краю вращающегося диска идут медленнее, чем на Земле или вблизи оси диска. Это подтверждает также опыт по сравнению спектральных линий на поверхности Солнца и в земной лаборатории.

Эйнштейн чувствовал, что все это с трудом воспринимается не только большинством «простых» людей, но и многими специалистами. Поэтому он, следуя примеру Галилея и его

знаменитым «Диалогам», публикует в 1918 году «Диалог по поводу возражений против теории относительности».

Это беседа между Критиком и Релятивистом, человеком, который выступает как сторонник теории относительности, а не как представитель философского течения, называемого релятивизмом.

Первый вопрос, поднимаемый Критиком, это вопрос о взаимном отставании часов в специальной теории относительности, эффект, который, по мнению Критика, приводит к противоречию с самими основами теории. Эйнштейн (ведь Релятивист представляет его точку зрения) поясняет, что в специальной теории относительности взаимное отставание часов неизбежно и парадокс близнецов не может быть разрешен в этой теории просто потому, что в ее рамках совершенно невозможно описать и рассмотреть процесс, в ходе которого один из близнецов, расставшись с братом, вновь возвращается к исходному месту. Ведь путешественник должен испытать ускорение, чтобы начать свое движение, затем он должен подвергнуться замедлению (отрицательному ускорению) и новому ускорению, чтобы начать обратный путь и, наконец, снова замедлиться, чтобы, погасив свою скорость, присоединиться к брату и сверить часы. Все эти этапы, на которых скорость не постоянна, выходят за пределы применимости специальной теории относительности. Однако отставание часов путешественника не только допустимо, но неизбежно с точки зрения общей теории относительности, применимой к ускоренным движениям.

Критик принужден согласиться с этим. Он говорит: «Признаюсь, что ты начисто отверг мое возражение, но должен сказать, что чувствую себя скорее изобличенным, чем убежденным твоими аргументами. Впрочем, мое возражение остается в силе, если стать на точку зрения общей теории относительности. В этом случае системы координат могут двигаться произвольно».

Эйнштейн объясняет, что общая теория относительности может применяться с одинаковым успехом к анализу процессов, наблюдаемых обоими близнецами. Но такое рассмотрение неизбежно покажет, что они находятся в различных условиях, и именно это приводит к расхождению хода их часов, к различному темпу старения их организмов.

Сейчас мы познакомимся со знаменитым мысленным опытом — с парадоксом близнецов, применяя при этом терминологию «Диалога» Эйнштейна. Рассмотрим, как оба близнеца, имеющие соответственно часы Ч1 и часы Ч2, воспринимают, описывают и истолковывают события, из которых складывается путешествие того из них, который везет с собой часы Ч1.

Близнец, оставшийся дома (часы Ч1)

Близнец-путешественник (часы Ч2)

Первый этап

Часы Ч2 ускоряются внешними силами до тех пор, пока не приобретут скорость V . Часы Ч1 покоятся.

Возникает гравитационное поле, в котором часы Ч1 вместе с Землей, с оставшимся на ней братом падают до тех пор, пока не приобретут скорость V . Часы Ч2 покоятся, так как удерживающие их силы не дают им падать. Когда часы Ч1 приобретут скорость V , гравитационное поле исчезает.

Второй этап

Часы Ч2 движутся с постоянной скоростью V и проходят путь L .

Часы Ч1 покоятся.

Часы Ч1 движутся с постоянной скоростью V и проходят путь L .

Часы Ч2 покоятся.

Третий этап

Часы Ч2 тормозятся, а затем разгоняются внешними силами до скорости V в обратном направлении. Часы Ч1 покоятся.

Появляется гравитационное поле, направленное обратно тому, что действовало вначале. Оно замедляет часы Ч1 и затем разгоняет их до скорости V в противоположном

направлении. После этого гравитационное поле исчезает. Часы Ч2 покоятся.

Четвертый этап

Часы Ч2 движутся с постоянной скоростью V назад. Часы Ч1 покоятся.

Часы Ч1 движутся с постоянной скоростью V назад. Часы Ч2 покоятся.

Пятый этап

Внешние силы останавливают перемещение часов Ч2, когда они прибывают в исходный пункт, рядом с часами Ч1. Часы Ч1 покоятся.

Возникает гравитационное поле, направленное, как вначале, и сводит к нулю скорость перемещения часов Ч1. После этого гравитационное поле исчезает. Часы Ч2 покоятся.

Нужно прежде всего подчеркнуть, что слова «покой» и «движение» относятся к перемещению часов в пространстве, а не к вращению их стрелок. Следует помнить и то, что в обоих столбцах описан один и тот же процесс, а не два различных процесса. Описания не совпадают, ибо они ведутся с различных точек зрения: с точки зрения близнеца-путешественника из его корабля и близнеца, спокойно ожидающего его дома. Несмотря на несовпадения, оба описания приводят к одному и тому же итогу: часы Ч2 отстанут от часов Ч1. Но каждый из участников опыта вынужден объяснять этот результат по-своему.

Близнец-домосед скажет: твои часы отстали потому, что они перемещались, двигаясь вместе с тобой, а мои часы все время покоились. Движущиеся часы всегда отстают от покоящихся.

Близнец-путешественник скажет: нет, дело не только в факте движения. Нужно присмотреться к деталям процесса. Твои часы действительно отставали во время второго и четвертого этапов моего путешествия, когда они двигались, а гравитационного поля не было. Но во время третьего этапа, когда я был очень далеко от тебя, а поэтому гравитационный потенциал, в котором ты находился, был очень велик, твои часы страшно спешили. Расчет показывает, что опережение твоих часов на этом этапе вдвое больше, чем их отставание на втором и четвертом этапах, вместе взятых. Первый и пятый этапы не вносят ничего существенного потому, что во время этих этапов ты был вблизи меня, гравитационный потенциал здесь был очень малым, а сам факт ускорения непосредственно не влияет на ход часов.

Так, не вдаваясь в подробности, объяснял Эйнштейн своему критику причину возникновения парадокса близнецов и суть этого парадокса. Надо сказать, что парадокс близнецов до сих пор обсуждается в научной литературе — ведь быстрый успех техники, новые точнейшие способы измерения времени уже привели к реальной возможности проверить, что же происходит в действительности. Сравнивались два экземпляра совершенно одинаковых атомных часов. Одни из них оставались на аэродроме, другие длительно находились на летящем самолете. Их отставание было надежно зафиксировано после возвращения на аэродром, в полном соответствии с теорией.

Конечно, пока маршруты ограничены, разница в показаниях часов близнецов невелика. Но при путешествиях в другие галактики и при скоростях, близких к скорости света, выигрыш во времени путешественника будет возрастать. Макмиллан из Калифорнийского университета в Беркли подсчитал: если удастся разогнать ракету до столь большой скорости, что при путешествии к туманности Андромеды — на расстояние в два миллиона световых лет — продолжительность полета по часам космонавта составит 29 лет, то по земным часам это время составит 3 миллиона лет...

Под гнетом новых сомнений

В 1918 году Эйнштейн, естественно, не думал о полетах в космос и говорил о внешних силах, не уточняя, как они возникают. Описывая происходящее с точки зрения близнеца-путешественника, он говорил о возникновении гравитационного поля, появление которого зафиксируют приборы, находящиеся внутри корабля.

Точно то же будут фиксировать приборы космонавта. Ведь приборы «не знают», что

космонавт включил двигатели и что фиксируемое приборами гравитационное поле есть эквивалент ускорения корабля относительно внешних тел.

Все рассуждения Эйнштейна остаются в силе. Но близнец-космонавт может видеть на своем телеэкране часы, находящиеся вместе с близнецом-домоседом. И наоборот: близнец-домосед может четко зафиксировать, что во время полета корабля с выключенными двигателями часы путешественника шли медленнее, чем его собственные. В это время их ход был постоянным и формулы теории относительности однозначно связывают ход часов со скоростью движения космического корабля, летящего по инерции. Работа двигателей на первом, третьем и пятом этапах полета не сказывается на ходе часов непосредственно. Ускорение влияет на ход часов через изменение скорости, а с изменением скорости изменяется и ход часов. При переменной скорости ход часов соответствует ее мгновенному значению. В данном случае эти изменения составляют очень малую величину по сравнению с отставанием часов во время длительного полета с выключенными двигателями. Поэтому приборы, оставшиеся на Земле, фиксируют, что практически все отставание часов путешественника накопится на этапах его полета по инерции.

В свою очередь путешественник на основе измерений получит тот же конечный результат, несмотря на существенное различие во время отдельных этапов. Его приборы тоже фиксируют отставание часов, оставшихся на Земле в то время, когда он летит с выключенными двигателями к звездам и обратно. Однако его приборы фиксируют и чрезвычайное ускорение хода земных часов, когда двигатели будут тормозить и разгонять его корабль в глубинах космического пространства. Его объяснение будет таким: когда пришла пора возвращаться, я включил двигатели. Создаваемое ими ускорение эквивалентно однородному полю тяготения. В районе моего корабля потенциал этого поля был не очень большим. Конечно, при этом я испытывал перегрузки, так же как в течение старта и финиша. Но они были не очень велики и практически не влияли на ход моих часов. Приборы показали мне, что во время этого маневра потенциал того же поля тяжести был там, у тебя, чрезвычайно большим. Поэтому твои часы спешили как сумасшедшие, а электрокардиограф показывал, что твое сердце стрекочет с необычайной скоростью. Я должен был бы опасаться за твое здоровье, если бы не знал, что это просто эффект теории тяготения, общей теории относительности. Ведь гравитационный потенциал, в котором ты находился, определялся не столько той перегрузкой, которую я должен был испытать, чтобы остаться, в покое, сколько расстоянием между нами, а оно было огромным. Именно поэтому во время старта и финиша, когда мы были близко друг от друга, я не наблюдал ничего особенного ни на твоих часах, ни на твоей электрокардиограмме. Итак, заключит путешественник, мои часы шли нормально, но они отстали от твоих потому, что твои часы очень спешили, когда я разворачивал свой корабль. Оба они фиксируют одно и то же: часы, совершившие путешествие, отстали от покоившихся часов.

Психологическое воздействие парадокса близнецов связано с тем, что при его обсуждении зачастую подменяют физическую теорию относительности вульгарными положениями философского релятивизма, провозглашающего, что «все в мире относительно». Физическая теория относительности не имеет ничего общего с такими высказываниями. Более того, общая теория относительности, основывающаяся на объективном факте относительности движения, относительности скорости и на абсолютном характере ускорения, которое эквивалентно соответствующему полю тяготения, позволяет получить математические формулы, дающие возможность вычисления всех эффектов: в том числе они позволяют во всех деталях проследить за тем, как происходит отставание часов близнеца-путешественника. Нужно привыкнуть к тому, что показания приборов на Земле и в ракете различаются между собой, а расчеты, выполненные на основе этих показаний, приводят к совпадающим окончательным результатам.

Специальная теория относительности, сохранившая привилегированную роль движения по инерции, не позволяет провести вычисления, необходимые для разъяснения парадокса близнецов, но она легко объясняет, почему некоторые элементарные частицы,

время жизни которых (то есть время их существования от момента возникновения до момента распада) очень мало, могут, родившись под воздействием космических частиц на верхние слои атмосферы, достичь поверхности Земли. Эти частицы летят почти со скоростью света, так что время их жизни, измеренное по земным часам, в десятки раз длиннее, чем их собственное время жизни. Специальная теория относительности достаточна для понимания этого опыта, потому что частицы здесь движутся по инерции прямолинейно и равномерно.

Общая теория относительности показала, что законы природы могут и должны быть сформулированы так, чтобы оставаться справедливыми при любых движениях. Соответствующие уравнения не должны менять своего вида при переходе от одной системы к другой, движущейся произвольным образом. На примере с часами близнецов мы видим: несмотря на то, что один и тот же процесс описывается в различных системах по-разному, результаты получаются одинаковыми. Именно в этом состоит преимущество и сила общей теории относительности. Она дает правильные результаты, не зависящие от того, где находится и как движется наблюдатель. Он должен, конечно, пользоваться правильными приборами и правильной теорией.

Например, изучая Солнечную систему, он может представить себя находящимся в центре Солнца и не участвующим в его вращении вокруг оси. Тогда его модель Солнечной системы совпадает с системой Коперника. В наши дни никому не придет в голову возвращаться к системе Тихо Браге или к системе Птолемея, хотя теория относительности показывает, как, путем математических преобразований, можно было бы осуществлять такой переход. Сложность и громоздкость геоцентрического описания являются одним из доказательств того, что такие системы весьма далеки от реальной действительности, хотя, применяя их для вычислений, тоже можно получать правильные результаты. Здесь еще раз следует вспомнить мысль Ломоносова о простоте природы и необходимости отказываться от усложнений при ее описании, если можно описать ее просто.

Эйнштейн считал недостатком общей теории относительности то, что гравитационное поле и электромагнитное поле выступают в ней как две несвязанные между собой сущности. Не удовлетворяло его и то, что теория никак не учитывает существование дискретных частиц вещества, элементарных частиц, атомов и молекул, а также дискретных порций энергии электромагнитного поля — фотонов. Сразу же после завершения общей теории относительности, теории тяготения, он начал обдумывать эти вопросы. Постепенно они выкристаллизовались в четкую физическую задачу, сложнейшую задачу, все больше подчинявшую его мысли и силы. Задачу, которая поглотила остаток его жизни и которая продолжает дразнить его последователей.

ТЕОРИЯ, КОТОРАЯ НЕ РАБОТАЛА

Драматические поиски единой судьбы мира

В этой книге мы встречались с различными теориями, возможности которых оказывались ограниченными. Такова обычная ситуация, возникающая в силу глубочайших диалектических законов человеческого познания. Ведь развитие науки безгранично. Научная теория не может появиться как продукт чистого разума. Она обязательно возникает и развивается из опыта, будь то наблюдения природных явлений, протекающих без участия человека, или эксперимент, специально поставленный для отыскания ответа на определенный вопрос. Правильно поставленные вопросы играют решающую роль в развитии знаний. В ходе длительной и не имеющей предела эволюции науки ни одна из теорий не возникла и не могла быть сформулирована в завершенной окончательной форме. Все они претерпевали развитие и уточнение и, если их основа была правильной, оставались в истории в качестве фундамента последующих более совершенных теорий. Даже теории, не

сохранившиеся при дальнейшем развитии науки, оказавшиеся неудовлетворительными в своей основе, зачастую приносили объективную пользу развитию науки и техники. Так было, например, с теорией теплорода, хорошо послужившей создателям первых паровых машин.

Наука — это драма, драма идей. Эти слова принадлежат величайшему физику, Ньютону двадцатого века, Эйнштейну. Но если искать в этой драме наиболее драматические эпизоды, то ничто не сможет сравниться с тянувшейся сорок лет историей попыток самого Эйнштейна создать единую теорию поля.

Общую теорию относительности недаром называют теорией тяготения. Она строго и однозначно связала свойства пространства с распределением в нем материи, свойства полей с телами, составленными из частиц. Она связала движение каждого тела с положением и движением всех остальных тел Вселенной, показала, как нужно формулировать все известные и еще неизвестные теории, чтобы они не входили в противоречие с реальной природой.

Все, правда немногочисленные, предсказания общей теории относительности были подтверждены опытом. Но у ее создателя оставалось чувство неудовлетворенности. Ему хотелось понять внутреннее единство природы. Этого понимания он не достиг. В общей теории относительности нет единства гравитационного и электромагнитного поля. В этой теории гравитационное поле, представляющее тяготение, самую древнюю из известных человеку сил природы, определяет свойства мира. Все остальное разыгрывается на этой сцене. В том числе и электромагнитное поле и все электромагнитные процессы существуют на этой сцене, никак не влияя на нее.

Это казалось Эйнштейну противоестественным. Он чувствовал, что электромагнитное поле играет в природе чрезвычайно важную роль, много большую, чем роль артиста, играющего на сцене. Но и воздушная балерина, перемещаясь по сцене, деформирует ее доски. Электромагнитные силы, думал он, должны влиять на структуру мира, в малом и в большом, в микромире и во Вселенной. И это должно найти отражение в теории. Теория должна обладать внутренним единством, ибо сама природа едина.

Так Эйнштейн пришел к необходимости создания единой теории поля. Он думал и о том, как свойства частиц связаны со свойствами поля, но считал эту задачу еще более трудной и отложил ее рассмотрение до решения первоочередной задачи. Это стало мечтой и целью его жизни, мукой его последних четырех десятилетий.

Он работал почти в одиночестве. Иногда ему помогали немногочисленные сотрудники, хорошие, но не выдающиеся ученые. Остальные не придавали значения его работам. Они отдавали все силы развитию квантовой теории. Теория поля казалась им устаревшей. Но Эйнштейн упорно шел своим путем, шел против основного течения в развитии науки. Однако теория, которая много раз казалась ее автору близкой к завершению, многократно обманывала его надежды. Она не работала! В каком смысле о теории можно сказать, что она не работает? Ни в одном ее варианте не удалось сделать ни одного предсказания — а это является главной задачей любой теории. Не удалось и упростить объяснение уже известного или описать с единой точки зрения явления, до того казавшиеся независимыми, что тоже может считаться оправданием создания новой теории. Эйнштейн умер полный надежд и планов. Но его немногочисленные сотрудники не продвинулись по избранному им пути. Лишь в преддверии к двадцатой годовщине смерти Эйнштейна опять возникли надежды на успешное решение поставленной им задачи. Надежды, основанные на удивительных результатах, представляющих синтез идей Эйнштейна о фундаментальном значении принципа относительности, о решающей роли симметрии физических законов и новых идей, выдвинутых представителями следующих поколений. Итак, вспомним историю развития единой теории поля и познакомимся с перспективами, открывающимися, хотя и смутно, в самое последнее время.

Так это началось

В разгар первой мировой войны, 2 декабря 1915 года, великий труженик и пацифист закончил свой титанический девятилетний труд скромной фразой: «...Наконец, завершено построение общей теории относительности как логической схемы». Но уже через год в большой обобщающей работе, давшей миру первое систематическое изложение новой теории вместе со всем необходимым математическим аппаратом и с четким указанием на связи с прежними теориями и с опытом, он пишет: «...может остаться открытым вопрос о том, смогут ли теория электромагнитного поля и теория гравитационного поля совместно служить базой для теории материи. Общий постулат относительности в принципе ничего не может сказать об этом. В процессе развития теории выяснится, смогут ли электродинамика и учение о тяготении вместе дать то, что не удавалось одной лишь первой теории».

Так это началось. Он не мог остановиться, сколь ни грандиозным оказалось уже достигнутое.

Первая попытка. Эйнштейн стремится дать совершенно новое формальное истолкование уравнений Максвелла в надежде, что при этом ему откроются какие-то перспективы, хотя бы чисто математические аналогии, указывающие путь к объединению электромагнетизма и гравитации. Первое разочарование. Новая формулировка стала более наглядной, но, по существу, все сохранилось по-старому. Электромагнитное поле оставалось балериной, бестелесно порхающей в поле тяготения.

Вторая попытка приводит к неожиданному открытию. Движение материальных тел должно возбуждать гравитационные волны, волны тяготения, так же как движение зарядов или магнитов возбуждает электромагнитные волны. Великий закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном, позволивший вычислять движения планет и их спутников, комет и астероидов, учитывать их взаимное влияние с огромной точностью, содержал в себе один порок, тревоживший его автора. Математическое выражение этого закона имеет такой вид, как если бы сила тяготения мгновенно распространяется на сколь угодно большие расстояния. Это противоречило всей доньютоновской механике, имевшей дело только с силами, передававшимися при соприкосновении тел. В законе тяготения на первый план выступила сила, действующая и через пустоту, без какого-либо видимого промежуточного агента. Ньютон, противник гипотез, стремился избежать гипотезы об эфире как передатчике сил тяготения. Он попросту отказался от обсуждения природы этих сил. Для него было достаточно установить математический закон их действия. Закон Кулона повторил все это для взаимодействия электрических зарядов. Отличие заключалось лишь в том, что, наряду с силами притяжения, появились силы отталкивания.

Фарадей покончил с дальнодействием электрических и магнитных сил. Максвелл придал идеям Фарадея математическую форму, создав теорию электромагнитного поля, передающего через пространство взаимодействие электрических зарядов и токов. Уравнения привели его к предсказанию существования электромагнитных волн, как самостоятельной реальности, не менее реальной, чем электрические заряды. Теория поля тяготения, общая теория относительности, как уже после ее создания установил Эйнштейн, содержала в своих уравнениях необходимость гравитационных волн, волн тяготения, устраняющих дальнодействие и из этой области науки.

Теперь, когда великий труд давно завершен, все выглядит поразительно просто и ясно. Пусть две звезды вращаются вокруг общего центра тяжести. Астрономы наблюдают множество таких «двойных» звезд. Любая третья звезда испытывает с их стороны притяжение, изменяющееся со временем в темпе вращения этой пары. Закон Ньютона позволяет вычислить эти изменения, но предсказывает, что они будут проявляться одновременно на любых расстояниях от двойной звезды. При этом даже не возникает вопроса о том, тратит ли эта звездная пара часть своей энергии на то, чтобы притягивать окружающие тела. Иное дело в теории относительности. Поле тяготения, окружающее звезду, представляет собой определенное свойство окружающего ее пространства. Вблизи звезды пространство не подчиняется геометрии Евклида. Кратчайшие линии в нем не

являются прямыми. Это неевклидово пространство. В нем движению по инерции соответствует свободное падение в поле тяжести, движение по геодезической линии в этом искривленном пространстве.

Если поле тяготения образовано двумя близкими двойными звездами, то для каждой из них движению по инерции соответствует вращение вокруг общего центра тяжести. Это же, но в других терминах, говорит и теория Ньютона. Различие начинается при описании сил, действующих на третье тело. Теория относительности говорит, что пространство, окружающее двойную звезду, искривлено более сложно, чем его искривление в окрестности одиночной звезды, и, главное, это искривление не вращается вместе с ними как единое целое, не охватывает одновременно все беспредельное пространство. Искривление разбегается во все стороны постепенно, в виде волн. От вращающейся пары звезд разбегаются волны, искривляющие пространство, или волны искривления пространства. Это и есть гравитационные волны, волны тяготения. Их скорость очень велика, она равна скорости света. Но она конечна. Поэтому волны тяготения достигают удаленных частей пространства позже, чем их действие проявляется вблизи их источника.

Вспомним наш опыт с куском холста, натянутым на обруч. Если на холсте лежит не один тяжелый шар, а два, они образуют в поверхности холста впадину более сложной формы, чем в случае, когда шар один. Если теперь придать этим шарам вращение вокруг оси, проходящей между ними, можно увидеть, как по поверхности холста по направлению к обручу побегут впадины сложной формы. Это наглядная модель гравитационных волн, излучаемых двойной звездой. Теперь маленький шарик не сможет спускаться от края обруча к его центру по простейшим кривым, напоминающим меридианы на глобусе. Он должен следовать по более сложным кривым. Нужно, однако, помнить, что реальный мир существует в четырехмерном «пространстве — времени», а наша модель представляет трехмерное «пространство — время». В модели поверхность холста двумерна, но при наличии шаров она не плоская, а криволинейная — неевклидова. Волны искривления холста будут увлекать маленький шарик в сторону вращения массивных центральных тел.

Модель отображает природу гравитационных волн и в том, что, при туго натянутом холсте, его искривления, хорошо видимые вблизи центра, быстро убывают к периферии и очень мало заметны вблизи обруча. Гравитационные волны, возбуждаемые вращением двойных звезд, тоже убывают с увеличением расстояния, а расстояния от них до Земли очень велики. Поэтому ученые пока не сумели зафиксировать существование гравитационных волн.

В отличие от теории Ньютона из теории тяготения следует: вращающаяся пара звезд расходует энергию на возбуждение гравитационных волн. Гравитационные волны уносят с собой часть энергии этих звезд. Речь идет о кинетической энергии их вращения вокруг общего центра тяжести.

Значит, двойные звезды не могут вращаться вечно по стационарным орбитам. Излучая энергию в виде гравитационных волн, они должны приближаться одна к другой по очень пологим спиральям, постепенно увеличивая частоту своего вращения. Это потрясающее предсказание казалось Эйнштейну не поддающимся проверке из-за малости энергии, уносимой гравитационными волнами и вследствие трудности измерения периодов обращения двойных звезд. Но совсем недавно радиоастрономы сумели подтвердить это предсказание! В излучении одного из пульсаров (звезд, излучающих периодические, пульсирующие импульсы радиоволн) обнаружены изменения, которые нельзя объяснить иначе, чем постепенным уменьшением периода его обращения вокруг незримого компаньона. Увеличение скорости вращения (уменьшение периода) этой пары не может быть вызвано ничем иным, как потерей энергии на излучение гравитационных волн. Оценки, проведенные для учета возможного действия других эффектов, например, учета влияния приливного трения, подтвердили, что речь может идти только о результате излучения гравитационных волн.

Эйнштейн, конечно, не мог знать об этом опыте. Но его уверенность в справедливости

общей теории относительности и ее предсказаний была столь велика, что он еще в 1916 году увидел в гравитационных волнах явление, делающее неизбежным дальнейшее развитие теории. Трудности, возникшие перед теорией тяготения, так же как затруднения теории Максвелла, связаны с существованием атомов. Электроны, вращающиеся вокруг ядра атома, должны, в соответствии с теорией Максвелла, излучать электромагнитные волны, терять энергию и падать на ядро. Теория Максвелла не может объяснить устойчивость атомов, их длительное существование. Выход из тупика дала гипотеза стационарных орбит, предложенная Бором. В атомах существует набор стационарных орбит, вращаясь по которым, электрон не излучает, не расходует энергию. В то время ни сам Бор, никто другой не могли объяснить, почему так происходит. Но с этим нужно было примириться. Ведь атомы существуют! Значит, внутри атомов теория Максвелла теряет силу.

А как же с гравитационными волнами, как обстоит дело с общей теорией относительности? Вот ответ ее автора: «Однако при всем этом атом, вследствие внутриатомного движения электронов, должен излучать не только электромагнитную, но и гравитационную энергию, хотя и в ничтожном количестве. Поскольку в природе в действительности ничего подобного не должно быть, то, по-видимому, квантовая теория должна модифицировать не только максвелловскую электродинамику, но также и новую теорию гравитации».

Модель порождается реальностью

Эйнштейн понимает: задача еще более осложнилась, возможно, все придется начинать сначала. Одиннадцать лет назад ему пришлось ввести в науку представление о квантах света. Теперь потребовались кванты гравитации. Иначе атом, спасенный Бором, погибнет из-за излучения гравитационных волн. Предсказание гравитационных волн и необходимости существования квантов гравитации — еще одно великое достижение Эйнштейна.

Так прошел год после рождения общей теории относительности, год первых признаний со стороны крупнейших ученых, первых нападков невежд, первых шагов к неизвестным вершинам, скрытым густым туманом незнания, маскирующим и неприступные стены и глубокие провалы. Следующий 1917 год, помимо обширного популярного изложения теории относительности, принес лишь одну работу, посвященную этой теории. Ее рамки были раздвинуты для того, чтобы охватить всю Вселенную. Теория Ньютона, связавшая единым уравнением движение планет и падение тел на Земле, натолкнулась на непреодолимые противоречия при попытке объяснить строение Вселенной, включающей всю совокупность звездного мира. Законы Ньютона говорят, что звезды должны быть сосредоточены в определенной, очень большой, но конечной области пространства. Из этого следует и Другое. Излучение звезд должно покидать занятую ими область и теряться в безграничном пространстве. Это же относится к отдельным звездам. Тяготение всей совокупности звезд не может удерживать отдельные, наиболее быстро движущиеся звезды, и они, подобно молекулам газа, расширяющегося в пустоте, должны убегать в бесконечность. Однако этот процесс разбегания не может остановиться, он не имеет конца, поэтому возникает противоречие с первоначальным выводом об ограниченности пространства, занятого звездами. Это лишь один из парадоксов, проявляющийся при попытке применить уравнения Ньютона ко всей Вселенной. Здесь невозможно обсуждать остальные. Ученые давно установили, что эту и другие подобные ей трудности нельзя преодолеть, оставаясь в рамках теории Ньютона. Можно было бы попытаться изменить закон Ньютона, но опыт не показывает, как это сделать, не поступая совершенно произвольно.

Обсудив еще раз трудности теории Ньютона, Эйнштейн пишет: «В дальнейшем я предлагаю читателю последовать пройденному мной самим извилистому и неровному пути, поскольку, как мне кажется, только так будет интересен конечный результат. Я пришел к убеждению, что уравнения гравитационного поля, которых я до сих пор придерживался, нуждаются еще в некоторой модификации, чтобы можно было на базе общей теории

относительности избежать тех принципиальных трудностей, которые в предыдущем параграфе были указаны для теории Ньютона».

Читатель, вспомни, что это написал человек, лишь незадолго до того завершивший десятилетний тяжкий труд по созданию теории, признанной специалистами выдающимся творением человеческого разума. Теперь этот труженик готов к дальнейшему походу. Он приглашает нас, а не только своих современников последовать за ним. Давайте же примем его приглашение, держась, однако, в почтительном отдалении от сложнейших математических формул.

Вот исходный пункт: «В последовательной теории относительности нельзя определить инерцию по отношению к «пространству», но можно определять инерцию масс относительно друг друга. Поэтому, если я удаляю какую-нибудь массу на достаточно большое расстояние от всех других масс Вселенной, то инерция этой массы должна стремиться к нулю. Постараемся сформулировать это условие математически».

Так это делалось! Физика, результаты физических опытов составляли основу, служили «принципами» в духе Ньютона, из которых при помощи математики должны быть сформулированы законы. Следствия из этих математических законов подлежат сопоставлению с опытом. Так создается современная наука. Впрочем, гипотезы, эти «пробные принципы», тоже вытекающие из опыта, не исключаются из арсенала настоящего ученого.

Еще одна попытка: нужно учесть, что все направления в пространстве равноправны, а потенциальная энергия массы в поле тяготения определяется не только ее инертной массой, но и некоторым постоянным коэффициентом — гравитационной постоянной. Это «принцип». Теперь очередь математики... Расчет показывает, что при этом Вселенной не грозит опасность стать пустой, но в теории возникают чисто математические противоречия, и она должна быть отброшена. Вывод: вероятно, не во всех случаях все направления в пространстве равноправны.

После рассмотрения ряда других возможностей Эйнштейн становится на путь, выбранный Максвеллом и приведший его к успеху. Максвелл в свое время прибег к математической гипотезе. Он ввел в свои уравнения член, не основанный на известных ему опытах, но делавший уравнения более симметричными, член, описывающий токи смещения в пустоте. Это решило дело. Так в науку вошли электромагнитные волны. Эйнштейн вводит в уравнения гравитационного поля произвольную «космологическую» постоянную. Успех! Этот новый член, введенный в теорию без каких-либо экспериментальных оснований, позволил объяснить устойчивое существование наблюдаемой Вселенной!

Вскоре, однако, выяснилось, что это решение не может быть окончательным. Но оно вызвало оживленную дискуссию. Среди других в ней принял участие Шредингер, в будущем внесший существенный вклад в создание квантовой теории. Теперь он опубликовал две статьи, предлагая в них свой вариант теории тяготения. Эйнштейн тоже ответил двумя короткими статьями. Вторая заканчивается такой итоговой фразой: «Прокладываемый Шредингером путь представляется мне непроходимым потому, что он слишком далеко заводит в густые дебри гипотез». Вот решающий аргумент человека, считающего, что модель мира, возникающая в мыслях людей, должна порождаться реальным миром, а не свободной фантазией, даже если она выглядит правдоподобной.

Существенный вклад в дискуссию внес и Леви-Чивита, ранние работы которого Эйнштейн, вместе с Гроссманом, использовал при создании математического аппарата общей теории относительности. Теперь Леви-Чивита предложил собственный вариант уравнений гравитационного поля. Интересна и поучительна аргументация, применяемая Эйнштейном при обсуждении предложений этого выдающегося математика. Эйнштейн пишет, что не существует никаких логических возражений против уравнений, полученных Леви-Чивитой, но эти уравнения допускают, что «материальная система может полностью раствориться, не оставив никаких следов». Это противоречит закону сохранения материи и энергии, и поэтому неприемлемо. Таково физическое соображение, заставляющее отвергнуть

построение Леви-Чивиты.

Эйнштейн видит — в этой сложной области ошибаются все. Ошибки тех, чьим мнением он особенно дорожит, Эйнштейн обсуждает в специальных статьях. Но сделать это по отношению ко всем оппонентам просто невозможно.

Одну из своих статей Эйнштейн начинает так:

«Хотя общая теория относительности и нашла признание у большинства физиков-теоретиков и математиков, почти все коллеги возражают против моей формулировки закона сохранения импульса-энергии. Однако я убежден в правильности моей формулировки и хочу в настоящей работе защитить со всей обстоятельностью свою точку зрения по этому вопросу».

Он вновь и вновь проверяет основы теории и ее математическое выражение. Основы не вызывают сомнения. Но есть две области, в которых ни прежние теории, ни теория относительности не могут дать надежных результатов. Это две неизученные проблемы, лежащие на противоположных границах освоенного. «Ни ньютонова, ни релятивистская теория тяготения до сих пор не продвинули вперед вопроса о структуре материи». Не продвинули они и вопроса о структуре Вселенной, и загадки элементарных частиц. Так Эйнштейн начинает очередную атаку. Все завоеванное должно быть сохранено, но необходимо продвигаться дальше!

Атака захлебнулась признанием того, что проблему строения элементарных частиц нельзя решить на основе уравнений поля общей теории относительности. Но достигнут существенный результат. Из уравнений можно выбросить космологический член, введенный в них в порядке математической гипотезы. Факт длительной неизменности Вселенной, ее видимой стационарности может быть объяснен и без этого члена. Злосчастный космологический член доставил Эйнштейну много забот. Несколько раз ему казалось, что можно обойтись без него. Затем надежда оказывалась ложной, и приходилось начинать все сначала. Но это было позже. Теперь же, несмотря на неудачу в главном, были и достижения. Уравнения дали интересную цифру, которая, правда, еще не могла быть проверена: три четверти энергии, присущей материи, составляющей Вселенную, приходится на электромагнитное поле, и только одна четверть на гравитационное поле. Является ли этот вывод окончательным и в чем его смысл?

Поход за золотым руном физики

Пауза затянулась. Атаку пришлось отложить и перейти к позиционным сражениям, к локальным разведывательным операциям, к отысканию возможных направлений дальнейшего, наступления. В январе 1921 года Эйнштейн еще раз объясняет, как человек, далекий от физики и математики, может преодолеть психологические трудности, препятствующие принятию новых взглядов. Теперь он непосредственно адресуется к ученым и гостям, присутствующим на торжественном заседании Прусской академии наук. Ведь именно среди них наибольшее количество противников теории относительности, смешивающих научные аргументы с эмоциями махрового шовинизма и расизма.

Эйнштейн не скрывает от них трудностей, поджидающих теорию в микромире с его квантовыми закономерностями и в космосе в связи с проблемой конечности или бесконечности мира. Его задача помочь тем, кто хочет, оставаясь на платформе науки, преодолеть трудности при попытке осмыслить четырехмерный мир и неевклидово трехмерное пространство. Доклад кончается знаменательными словами: «...человеческая способность мысленного представления ни в коем случае не должна капитулировать перед неевклидовой геометрией».

Следующее выступление на эту тему адресовано специалистам. Это четыре лекции, объединенные общим названием «Сущность теории относительности», прочитанные в мае 1921 года в Принстонском университете. Они отражают последовательные этапы развития идей и математического формализма теории относительности. Слушатели становятся

спутниками лектора на неизбежном пути к пониманию объективных закономерностей природы и останавливаются вместе с ним на пороге загадок космоса. От космологического члена, говорит Эйнштейн, вероятно не удастся отказаться. Вселенная, по-видимому, ограничена в пространстве. Инерция каждого тела, скорее всего, определяется действием всех остальных тел. Геометрические свойства мира полностью зависят от его физических свойств. Но как ввести все это в единую непротиворечивую теорию?

Принстонские лекции стали как бы костяком, на который наращивалось все остальное. Они издавались много раз. В 1945 году они были изданы с приложением «О космологической проблеме». Здесь Эйнштейн окончательно отказывается от введения космологического члена. В том же году лекции вышли еще раз, уже с двумя приложениями; второе содержало изложение единой теории поля. Это приложение было переработано в 1953 году и заканчивалось выражением уверенности в том, что единая теория, включающая и объяснение квантовых явлений, вскоре будет завершена. Увы, жизнь Эйнштейна закончилась раньше.

Но мы забежали вперед в описании увлекательного похода к сокровенным тайнам природы. Значительные трудности на этом пути были связаны со стремлением Эйнштейна выразить формулами теории его убеждение в том, что мир вечно был и остается таким, каким он выглядит теперь. Казалось, единственный способ описать это на языке математики — найти стационарные (не изменяющиеся со временем) решения уравнений теории. Постепенно Эйнштейн перешел от предположений к уверенности в том, что описать свойства мира, известные из опыта, могут только стационарные решения уравнений. Не изменила его точки зрения и работа Фридмана «О кривизне пространства», опубликованная в начале 1922 года. В этой работе Фридман показал, что уравнения теории тяготения наряду со стационарными решениями допускают и нестационарные, изменяющиеся со временем. Эйнштейн ответил короткой заметкой. Ее первая фраза: «Результаты относительно нестационарного мира, содержащиеся в упомянутой работе, представляются мне подозрительными». Далее в нескольких строках сообщаются результаты контрольных вычислений, приводящие к выводу: из работы Фридмана следует, что радиус мира не изменяется со временем. «Следовательно, значение этой работы в том и состоит, что она доказывает это постоянство».

Весной следующего года в Берлин приехал советский физик Крутков. Он посетил Эйнштейна и беседовал с ним. Так появилась следующая заметка. «В предыдущей заметке я подверг критике названную выше работу. Однако моя критика, как я убедился из письма Фридмана, переданного мне г-ном Крутковым, основывалась на ошибке в вычислениях. Я считаю результаты Фридмана правильными и проливающими новый свет. Оказывается, что уравнения поля допускают наряду со статическими также и динамические (то есть переменные относительно времени) центрально-симметричные решения для структуры пространства».

Так, открыто и публично, признают свои ошибки настоящие ученые. Это признание открыло новый этап в космологических аспектах теории относительности. Пришло время, когда попытки Эйнштейна добиться органического объединения электромагнитного поля с гравитационным привлекли внимание ученых. Вейль, Эддингтон, Леви-Чивита и Калуца присоединились к нему и предложили различные пути достижения этой цели. Эйнштейн с интересом следил за их попытками и обсуждал их результаты. Сам он начал публиковать свои варианты теории лишь в 1923 году. Они основаны на математическом открытии, сделанном Леви-Чивитой и Вейлем. Эти ученые обнаружили в геометрии Римана особенность, которой раньше никто не придавал должного значения. Теория пространства — геометрия — может быть построена и в том случае, если отказаться от инвариантности (неизменности) длин малых отрезков. Достаточно, если инвариантным будет отношение двух таких отрезков, проходящих через общую точку. Важно лишь, чтобы это отношение сохранялось при параллельном переносе этих отрезков. На такой основе можно сформулировать полную и непротиворечивую геометрию, но этого еще не достаточно для

построения физической теории. Следующий шаг сделал Эддингтон, но и он не сумел продвинуться достаточно далеко. Он был вынужден остановиться, потому что в теорию вошли 40 неизвестных функций и не видно было простого и естественного пути, следуя которому можно их определить.

После длительных раздумий и проб, в процессе которых проверялись различные математические методы, Эйнштейн привлек на помощь принцип Гамильтона, который в классической механике Ньютона показывал, какие из многообразных возможностей движения реализуются в природе. Этот принцип позволил Эйнштейну написать уравнения, необходимые для того, чтобы определить все функции, входящие в теорию. Из теории, построенной этим путем, вытекают все известные законы гравитационного и электромагнитного полей, но она ничего не говорит о структуре электрона. Сделана половина дела, но главная цель осталась недостигнутой!

Однако Эйнштейн не падает духом. Трудности на пути к великой цели неизбежны. Найти легкий путь безнадежно. И он последовательно развивает свои идеи в ряде статей. Замечательно, что уже во второй статье содержится указание на то, что теория не может учесть различие в массах положительных и отрицательных электронов. Это было задолго до того, как Дирак предсказал существование положительного электрона, вытекавшее из уравнений квантовой механики, видоизмененных с учетом требований теории относительности. Странно, что после открытия положительного электрона — позитрона никто не вспоминал о том, что история его предсказания восходит к маю 1923 года! Теперь мы можем сказать, что теория опередила свое время, ибо, не зная о существовании позитрона, Эйнштейн тратил много сил на создание теории, в которую бы не входил положительный электрон...

Последующие три года прошли под знаком развития теории, основанной на идее так называемой аффинной связи, идее, ставящей во главу угла свойства отношений отрезков, законов их параллельного переноса.

Кладбище погребенных надежд

В 1927 году Эйнштейн еще раз трагически обогнал свое время. Сделав решающий шаг в объединении уравнений теории поля с движением частиц в этом поле, он пришел к выводу о существовании нейтральных элементарных частиц. Но нейтрон и нейтрино еще не были открыты, и он вынужден написать: «Однако известно, что в природе не встречаются электрически нейтральные атомные массы, и, следовательно, предмет нашей работы не соответствует непосредственно объектам природы. Достигнутый успех заключается, однако, в том, что впервые показано, что теория поля может содержать в себе теорию движения дискретных частиц вещества».

Эйнштейн делает еще одну попытку продвинуться по избранному пути, до предела упрощает громоздкий математический аппарат теории, но убеждается в том, что получить что-либо конкретное таким путем не удастся. Новые мучительные раздумья приводят к тому, что шахматист назвал бы «жертвой». Эйнштейн решил: препятствием к дальнейшему продвижению стала геометрия Римана, заменившая геометрию Евклида и позволившая создать общую теорию относительности, теорию тяготения. Двигаться дальше на основе геометрии Римана кажется невозможным, в ней совершенно отсутствуют понятия, которые можно было бы сопоставить с электромагнитным полем. Значит, геометрия Римана не может служить основой дальнейшего развития физической теории поля. Следовательно, ею необходимо пожертвовать и этой ценой продвинуться дальше. Нужно создать новую геометрию, в которую вошло бы несвойственное геометрии Римана понятие «направленности», или «параллелизма», сохраняющее смысл для конечных расстояний. При этом в теорию войдут новые инварианты и тензоры, еще не примененные при объяснении поля тяготения. Их можно будет использовать для построения теории электромагнитного поля.

Эйнштейн начал работать в новом направлении в 1928 году. Он возлагал на это направление большие надежды и затратил огромный труд на преодоление сложнейших математических проблем. Правда, вскоре математики обнаружили, что математическая часть этих работ уже известна в математической литературе, но недостаток теории заключался в другом. Она оказалась столь сложной, что не было видно способа, позволяющего получать из нее выводы, допускающие проверку.

Не выполнялось и основное требование, предъявленное Эйнштейном к разумной теории. Она не позволяла делать предсказания.

Вот как Эйнштейн подводит итоги 15-летнего развития теории: «С тех пор как в 1915 году была сформулирована общая теория относительности, теоретики настойчиво пытались найти общую основу для гравитационного и электромагнитного полей. Трудно было думать, что эти поля соответствуют двум пространственным структурам, между которыми нет фундаментальной связи. Отсюда возникли теории Вейля и Эддингтона, от которых, однако, авторы отказались, теория Калуцы и теория абсолютного параллелизма. После того как мы проработали около года над дальнейшим развитием последней теории, мы пришли к заключению, что избрали неверный путь, а теория Калуцы, хотя и неприемлема, все же ближе к истине, чем другие теоретические построения... Среди соображений, которые заставляют усомниться в этой теории, на первом месте стоит следующее: вряд ли разумно заменять четырехмерный континуум на пятимерный и затем искусственно налагать ограничения на одно из этих пяти измерений с тем, чтобы объяснить, почему оно не проявляет себя физически. Нам удалось сформулировать теорию, которая формально близка к теории Калуцы, но свободна от упомянутого возражения. Это достигается путем введения совершенно нового математического понятия...».

Так Эйнштейн еще раз выразил свое постоянное стремление оставаться на твердой почве физических явлений, вновь объявил о своих новых идеях и новых надеждах. Начался следующий этап создания единой теории поля, потребовавший еще пятнадцати лет настойчивого труда, раздумий и сомнений.

Итак, главный порок теории Калуцы — введение пятимерного пространства, в то время как опыт неопровержимо свидетельствует о том, что мы живем в четырехмерном мире, в котором имеется три направления в пространстве и одно направление во времени. Математическое открытие, о котором писал Эйнштейн, состоит в том, что в четырехмерном пространстве можно математически рассматривать пятимерные величины — векторы и тензоры.

Суть этого открытия можно почувствовать, вообразив движущуюся по одномерной линии точку, температура или электрический заряд которой изменяются произвольным образом. Так свойства точки могут быть двухмерными и трехмерными, хотя она существует в «одномерном мире» — на линии. Новая идея действительно позволила создать теорию, в которой гравитационное и электромагнитное поля представляют две стороны единой сущности. Но надежды на то, что эта теория одновременно и естественно объяснит существование частиц материи, не оправдались...

Эйнштейн попытался модифицировать пятимерную теорию, отступив назад к идее Калуцы. Не отказываясь от уверенности в том, что реальный мир имеет лишь четыре измерения, он предположил, что в пятом измерении мир замкнут, подобно тому как замкнута в себе линия окружности или эллипса. Теория еще более усложнилась, но не дала решения загадки частиц. Не дала результатов и попытка рассматривать гравитационное поле и электромагнитное поле независимо, как два листа сложной поверхности. При этом частицы могли бы выступать как мостики, соединяющие эти листы. Такой путь оказался слишком сложным. Связать уравнения, полученные из такого подхода, с реальным миром не удалось. Огромные усилия, направленные на изменение теории, не привели к успеху. «Результатом оказалось кладбище погребенных надежд». Так охарактеризовал Эйнштейн попытки объединения теории поля и квантовой теории.

Завещание

К 1943 году удалось строго доказать, что ни один из предложенных вариантов не может служить путем к объединению теории поля с квантовой теорией. Казалось, кладбище идей окружено непреодолимой стеной.

Наступил 1945 год! Год великой победы над нацистской чумой. Возможно, это придало Эйнштейну новые силы. Он нащупывает выход из тупика. Новое обобщение общей теории относительности, в которой гравитационное и электромагнитное поля, ранее выступавшие независимо, образуют теперь формальное единство. Еще невозможно сказать, можно ли довести соответствующие уравнения до решений, сопоставимых с опытом. «Это — трудная задача. Однако теория кажется достаточно естественной, чтобы оправдать даже большие усилия».

Так начался еще один поход за золотым руном физики, единой теорией поля. Одна из математических возможностей нового обобщения теории — рассмотрение комплексных полей, прием, широко применяемый при проведении электротехнических расчетов. Но проклятый вопрос о происхождении частиц по-прежнему остается камнем преткновения. Все более настойчиво возникают и другие вопросы. Прежде всего вопрос о том, почему время течет только в одном направлении, почему оно не допускает остановки? Как наиболее естественно ввести в теорию это различие между изменениями пространственных координат и времени? Ведь в пространстве можно двигаться в любом направлении. Нельзя отгородиться и от выбора между вероятностным и динамическим рассмотрением природы.

18 апреля 1955 года смерть оборвала последний поход великого искателя. Бесцельно гадать, как он мог реагировать на каскад открытий в космосе и микромире, свалившийся на нас за истекшие полвека...

Его научное завещание содержится в какой-то мере в заключительных общих замечаниях к последней из опубликованных им работ. Вот некоторые выдержки, показывающие, с чем ушел из жизни Ньютон двадцатого века.

«С моей точки зрения, изложенная здесь теория является логически простейшей релятивистской теорией поля, возможной вообще. Но это не значит, что природа не может подчиняться более сложным теориям поля. Более сложные теории поля предлагались часто... На мой взгляд, подобные более сложные теории и их комбинации следует рассматривать только в том случае, если для этого будут существовать физические причины, основанные на эксперименте. Можно ли думать, что теория поля позволит понять атомистическую и квантовую структуру реальности? Почти каждый ответит на этот вопрос «нет». Но я полагаю, что по этому поводу в настоящее время никому не известно ничего достоверного... Здесь может помочь только существенный прогресс в математических методах. В настоящее время преобладает мнение, что теорию поля сначала необходимо перевести «квантованием» в статистическую теорию вероятностей, следуя более или менее установленным правилам. Можно убедительно доказать, что реальность вообще не может быть представлена непрерывным полем. Из квантовых явлений, по-видимому, следует, что конечная система с конечной энергией может полностью описываться конечным набором чисел (квантовых чисел)... Однако сейчас никто не знает, как найти основу для такой теории».

Так, с глубоким уважением излагая взгляды своих многолетних друзей-оппонентов, главными из которых были Бор и Борн, Эйнштейн твердо отстаивает свою точку зрения: теория поля лучше соответствует сущности природы, ибо она не предполагает существования сил, действующих без посредников на любых расстояниях с бесконечной скоростью. Современная квантовая теория не может обойтись без представлений о мгновенных квантовых скачках, непосредственная причина которых остается за пределами науки.

Жизнь Эйнштейна заставляет вспомнить поэтическую историю Данко, вырвавшего свое сердце, чтобы, освещая им путь, вывести людей из тьмы к свету. Эйнштейн не дошел до

победы, но он передал свое пылающее сердце последователям, самоотверженно продолжающим поход за истиной. Их немного, их влекли надежды и поджидали разочарования. Но они заслужили того, чтобы интересующиеся прогрессом науки знали об их делах.

ПОИСКИ ГАРМОНИИ МИРА

Путеводная нить симметрии

В то время когда Эйнштейн создавал общую теорию относительности, мир представлялся очень простым. По крайней мере, сейчас нам кажется, что он должен был выглядеть простым. Вся природа мыслилась комбинацией электронов и атомных ядер, между которыми действуют электромагнитные силы. Более слабые силы тяготения проявлялись лишь при взаимодействии крупных тел. Ядра атомов казались построенными из самых простых ядер атомов водорода. Правда, не было известно, как это происходит. Еще непривычными были недавно обнаруженные Планком квантовые скачки и кванты света, введенные в теорию Эйнштейном. Но никто не сомневался в том, что все вскоре прояснится. Теперь не то. Никто не надеется на скорые и легкие ответы. Выяснилось, что мир очень сложен. XX век дал о нем столько сведений, что мы еще не можем их полностью обобщить, систематизировать, осмыслить и на новой основе сделать выводы. Число известных микрочастиц перевалило за сотню. Их называют элементарными только по привычке. Появились кандидаты в суперэлементарные, или «истинно элементарные», частицы. Что делать — многие из тех, что ранее представлялись элементарными, оказались состоящими из еще более простых частиц.

Количество известных сил взаимодействия удвоилось. Их уже четыре: сильные взаимодействия, проявляющиеся между тяжелыми частицами; электромагнитные взаимодействия, свойственные лишь заряженным частицам; слабые взаимодействия, сопутствующие распадам многих частиц, и гравитационные взаимодействия, еще более слабые, но универсальные и действующие между всеми известными частицами.

Неужели природа действительно так сложна? Или за деревьями мы не видим леса? За множеством деталей, за видимым разнообразием не замечаем внутреннего единства? Усилия физиков-теоретиков по-прежнему направлены на постижение единства мира. Убеждение в гармонии и простоте природы, пришедшее к нам от древних, обновленное Ломоносовым и избранное в качестве знамени Эйнштейном, вдохновляет самых бесстрашных и настойчивых.

Теперь мы познакомимся с новейшей теорией, имеющей непосредственное отношение к единой теории поля. Она получила наименование теории супергравитации, — теория гравитационного поля входит в нее как часть, наряду с теорией других полей. Фундаментальную роль в построении новой теории играет понятие симметрии. Свойства симметрии, присущие природе, поражали человека еще в глубокой древности, оказывали значительное влияние на искусство и все более глубоко входили в науку.

Слово «симметрия», как многие научные термины, происходит от греческого слова. В данном случае греческая основа означает «соразмерность» — совпадение различных размеров какого-либо предмета или тела. Многие цветы и листья симметричны. Симметричны и тела животных. Конечно, это лишь приближенная симметрия. Правая и левая рука, отдельные лепестки сирени очень близки по форме и размерам, но не совпадают в малых подробностях. Архитектура и графика, живопись и прикладное искусство восприняли у природы симметрию как некий идеал, доставляющий нам эстетическое наслаждение. Геометрия и математика выразили идею симметрии множеством теорем.

Многие законы симметрии очень просты. Простейшая симметрия — это трансляционная, или сдвиговая симметрия. Рисунок на обоях будет выглядеть неизменным,

если передвинуть его на один, два или другое число шагов, через которые повторяются детали рисунка. Немного сложнее зеркальная симметрия. Отражение в плоском зеркале полностью совпадает с объектом, но левая сторона оказывается справа и наоборот. Интересными свойствами обладает и вращательная симметрия. Например, вырезав из бумаги прямоугольник, легко убедиться, что его можно сложить вдвое вдоль прямых, проходящих через середины его сторон. Это две оси симметрии. Если все стороны прямоугольника равны между собой, то он приобретает еще две оси симметрии. Ими являются диагонали, а симметрия относительно диагоналей является признаком квадрата и ромба, то есть прямоугольника, все стороны которого равны. Симметрия этого типа проявляется не только при изгибании, но и при повороте фигуры вокруг ее центра. В случае прямоугольника для совпадения необходим поворот на 180° . В случае квадрата — на 90° . Окружность — наиболее симметричная фигура на плоскости. Она повторяет свои контуры при любом повороте. Аналогичные свойства симметрии присущи и объемным трехмерным телам, например кубу или сфере.

Свойства симметрии присущи не только форме предметов, но и многим силам природы. Например, сила упругости пружины всегда направлена навстречу силе, деформирующей ее, и, при малой деформации, пропорциональна ее величине. Естественно, что свойства симметрии, присущие явлениям природы, проявляются в симметрии математических формул, описывающих эти явления. Наличие такой симметрии может служить одним из критериев того, соответствует ли физический закон, а также выражающая его математическая формула описываемому явлению природы.

Первым принципом симметрии, сознательно сформулированным в виде физического закона, был принцип относительности Галилея. Наблюдатель, стоящий на берегу, описывает все явления природы так же, как это делает наблюдатель на борту корабля, движущегося прямолинейно и равномерно. Единственное различие заключается в направлении их относительного движения. Оно учтено в формулах преобразования, носящих имя Галилея; каждый может надежно полагаться на наблюдения, выполненные другим. Симметрия формул обеспечивает единство результатов.

Максвелл получил свои знаменитые уравнения, исходя из убеждения в симметрии между электрическими и магнитными явлениями. Он начал свои попытки выражения законов электрических и магнитных явлений с того, что обобщил найденные его предшественниками уравнения, описывавшие эти явления по отдельности. В результате он пришел к уравнениям, не обладавшим математической симметрией. Тогда, исходя из убеждения в том, что взаимодействие электрического и магнитного полей должно быть симметричным, он ввел в свои уравнения дополнительный член, придавший им свойство симметрии. Никаких других оснований для введения этого члена у Максвелла не было. Он описывал этим членом никогда не наблюдавшееся возникновение магнитного поля в результате изменения электрического состояния пустого пространства. По аналогии с током смещения зарядов в диэлектрике Максвелл назвал это гипотетическое изменение током смещения в вакууме. Много позже существование этого тока было подтверждено опытом.

Смелая гипотеза, не опиравшаяся на опыт, а лишь на уверенность в симметрии законов природы, привела Максвелла к неизбежному выводу о существовании электромагнитных волн. Это было ново и казалось современникам странным, удивительным и даже подозрительным и поэтому надолго задержало признание теории Максвелла. Лишь много позднее, после того как Герц при помощи специальных опытов подтвердил правильность утверждения Максвелла о том, что электромагнитные волны действительно существуют, а свет есть лишь частный случай электромагнитных волн, теория Максвелла вошла в основной фонд науки. Однако вскоре выяснилось, что внутренняя симметрия уравнений Максвелла не обеспечивает соблюдения симметрии, обнаруженной в области механики Галилеем. Устранить это противоречие не удалось. Это была одна из причин кризиса, потрясшего физику на рубеже XX века.

Идея Эйнштейна, приведшая его к созданию теории относительности, опиралась, по

существо, на уверенность в более глубокой симметрии природы. Эта симметрия должна одновременно охватывать электромагнитные, механические и все другие явления. Главной заслугой Эйнштейна в этой области было то, что он показал причину, мешавшую выявлению этой симметрии. Препятствием было властвовавшее над умами людей убеждение в абсолютном характере понятий времени и одновременности. Эйнштейн критически проанализировал процесс измерения пространственных расстояний и интервалов времени и показал, как необходимо уточнить математические преобразования, соответствующие принципу Галилея, заменив их другими. Потом оказалось, что это есть преобразования Лоренца. Так родилась специальная теория относительности, сумевшая выявить глубокую симметрию в уравнениях движения, увязав ее с симметрией уравнений электродинамики. При этом Эйнштейн обнаружил и особую симметрию материального мира, проявляющуюся в том, что масса тел связана с содержащейся в них энергией.

Догадка Менделеева

На симметрию другого рода наткнулись химики, установив, что химические элементы образуют как бы своеобразные группы, объединяемые общностью их свойств. Эта симметрия была выявлена в полной мере, когда, Менделееву удалось сгруппировать все известные в его время химические элементы в таблицу так, что элементы, свойства которых близки, расположены один под другим в столбцах этой таблицы в порядке возрастания их атомных весов. Таких столбцов оказалось восемь. Уверенность Менделеева в реальности открытой им симметрии была столь велика, что он оставлял пустые места в своей таблице в ожидании элементов, которым были предназначены эти места. Он сдвигал в другие клетки таблицы известные ему элементы, если они не соответствовали свойствам симметрии, определяемым периодическим законом, воплощенным в таблице. Он даже переставлял местами элементы, если известные ему атомные веса не соответствовали таблице. Последующие исследования привели к открытию новых химических элементов, заполнивших пустые места таблицы Менделеева, а атомные веса, «противоречившие» таблице, оказались неточными и были исправлены.

Непонятная симметрия была обнаружена и в расположении спектральных линий спектров атомов. В этих спектрах есть группы линий, длины волн которых подчиняются простым математическим закономерностям. И математические формулы, описывающие спектры элементов, расположенных в одних и тех же столбцах таблицы Менделеева, тоже отличаются лишь простыми числовыми множителями. Это совпадение долго дразнило ученых, казалось удивительным и необъяснимым. Размышления над странной симметрией спектров привели Бора к квантовой модели атома, одновременно «объясняющей» и причину этого совпадения и устойчивость планетарной модели атома. Кавычки в предыдущей фразе появились потому, что Бор, по существу, не объяснил, а постулировал, то есть предположил, что электроны, вращаясь вокруг ядра атома по определенным избранным орбитам, не подчиняются уравнениям Максвелла и поэтому не теряют энергию на излучение электромагнитных волн. Они излучают или поглощают порцию энергии, только перескакивая с одной орбиты на другую. Мы уже знаем, что эти кванты и составляют энергетическое досье веществ — их спектры.

Прошло более десяти лет прежде чем на смену примитивным правилам квантования Бора-Зоммерфельда пришла новая квантовая механика, способная с единой точки зрения объединить и объяснить симметрию атомных спектров и симметрию свойств атомов различных химических элементов. Решающую роль при этом сыграло осознание правил запрета, показавших, что между объектами микромира существуют взаимодействия, никогда не проявляющиеся в поведении обычных тел, состоящих из множества атомов. То, что разрешено одиночкам, зачастую запрещено частицам в коллективе.

Еще одно открытие позволило исследователям проникнуть в смысл поведения электронов. Более точные исследования спектров многих элементов показали, что, вопреки

предсказаниям теории, ряд спектральных линий представляет собой не одиночную линию, а пару близких линий. Причину этого удвоения оказалось невозможным объяснить иначе, чем наличием у электрона собственного вращательного момента. Электрон нельзя рассматривать просто как заряженную точку или заряженный шарик. Он одновременно ведет себя как маленький вращающийся волчок. Свойство электрона вести себя как волчок получило название «спин» — от английского «вращаться». Позднее выяснилось, что все элементарные частицы, помимо ряда других свойств, характеризуются спином. Их спин может принимать только простые численные значения: $0, \pm 1/2, \pm 1, \pm 3/2 \dots$

Но не будем забежать вперед. Возвратимся к электронам, входящим в состав атомов. Эти электроны, как, впрочем, и все другие, например, свободные электроны, работающие в радиолампах, имеют спин, равный $\pm 1/2$. Сдвоенные линии в атомных спектрах возникают потому, что в каждом разрешенном состоянии (в то время «разрешенными состояниями» считались устойчивые орбиты электронов в атомах, существование которых постулировал Бор) может находиться только один электрон. При этом энергия электрона, имеющего спин $+1/2$, отличается от энергии электрона, находящегося в том же состоянии, но обладающего спином, равным $-1/2$. Разница в знаке указывает на различное направление вращения.

С точки зрения квантовой механики — различные энергии означают различные состояния. Значит, электроны, летающие по одной и той же боровской орбите, но имеющие спины, различающиеся знаком, находятся в различных состояниях и имеют слегка различные энергии. А переходы электронов между различными состояниями приводят к образованию различных спектральных линий. Так гипотеза спина объяснила существование непонятных ранее сдвоенных спектральных линий — дублетов.

Возведя гипотезу о том, что два электрона с одинаковым знаком спина не могут занимать общую орбиту в атоме, в ранг общего правила, удалось объяснить сущность Периодического закона Менделеева. Вот как работают гипотеза спина и правило запрета в этом случае далеко за пределами области, в которой они были выдвинуты. В соответствии с гипотезой Резерфорда атомы состоят из ядра и внешних электронов. Для наглядности, по предложению Бора, можно представить себе, что электроны занимают определенные орбиты. В атоме водорода имеется один электрон, у гелия их два, у лития три и т. д. Последовательное заполнение орбит обусловлено правилом запрета: одна и та же орбита не может быть занята двумя электронами, находящимися в одинаковом состоянии. Значит, в атоме гелия, ядро которого имеет заряд, равный двум, и способно удержать два электрона, эти два электрона, находясь на нижней орбите, не могут находиться в одинаковом состоянии. Поэтому их спины должны иметь противоположные знаки и, благодаря этому, должны быть взаимно скомпенсированы. Это очень устойчивая структура, определяющая химическую инертность атома гелия. Именно стремление к «компенсации» спина заставляет два атома водорода соединиться в молекулу. В этой молекуле, содержащей два ядра водорода, имеются два электрона, спины которых противоположны по знаку и взаимно скомпенсированы. Вследствие этого молекула водорода гораздо более инертна, чем одиночный атом водорода, в котором спин единственного электрона не скомпенсирован и «ищет» партнера, способного его скомпенсировать.

Вслед за гелием в Периодической таблице Менделеева располагается литий. Заряд его ядра равен трем, поэтому оно окружено тремя электронами. Третий электрон начинает заполнение следующей электронной оболочки, окружающей устойчивую электронную оболочку гелия. Спин этого электрона некомпенсирован — электрон как бы в ожидании партнера. Как следствие, литий обладает большой химической активностью. Вторая электронная оболочка оказывается заполненной, когда на ней находятся 8 электронов. Соответствующее ядро имеет заряд, равный 10. Это атом инертного газа неона.

Здесь нет места для более подробного описания связи структуры электронных оболочек атомов с их положением в таблице Менделеева, но каждый желающий может продлить этот анализ в пределах всей таблицы химических элементов.

Серьезность «Шуточной физики для пешеходов»

Открытие спина электрона и его роли, как характеристики квантового состояния электрона в микросистемах, имело далеко идущие последствия. Выяснилось, что наличие спина вносит существенные особенности в поведение объектов микромира. Целый ряд трудностей и парадоксов, с которыми встречалась классическая статистика при попытках применить ее для описания свойств микромира, связан с тем, что она попросту неприменима к этому кругу явлений. Все эти трудности и парадоксы исчезли как по мановению волшебной палочки после того, как Ферми и Дирак разработали особую статистику. Она учитывала принцип запрета, заставляющий из набора возможных состояний системы принимать во внимание только те, где каждое квантовое состояние занято лишь одной частицей. Вскоре, однако, оказалось, что и новая квантовая статистика не способна объяснить часть закономерностей микромира. Прежде всего это было установлено в процессах с участием фотонов.

Выход из тупика обнаружил индийский физик Бозе. Он послал свою работу «отцу фотонов» — Эйнштейну, который сразу же оценил ее выдающееся значение и немедленно рекомендовал к опубликованию. Идея Бозе опиралась на то, что частицы, обладающие целочисленным значением спина, а фотоны принадлежат к их числу, не подчиняются правилу запрета. Значит, они не должны подчиняться статистике Ферми-Дирака. Поэтому в каждом квантовом состоянии может находиться любое число таких частиц. Физики вздохнули с облегчением. Работы Эйнштейна в области квантовых свойств света послужили ему отличной основой не только для понимания идеи Бозе, но и для ее воплощения в строгую математическую форму. Так возникла новая квантовая статистика — статистика Бозе-Эйнштейна, а частицы микромира оказались сгруппированными в два существенно различных класса. Частицы, принадлежащие к одному из них, получили название бозонов. Они характеризуются целочисленным значением спина ($0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$) и подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Частицы второго класса характеризуются полуцелыми значениями спина ($\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2 \dots$) и подчиняются статистике Ферми — Дирака.

Причина и значение такого разделения оставалась в течение долгого времени таинственным и непонятным фактом. Лишь совсем недавно появились надежды на то, что и эта загадка будет разрешена. В основе этого различия, вероятно, лежит еще один тип симметрии, присущий микромиру. Как это ни курьезно — первый подход к решению загадки различия между фермионами и бозонами был опубликован в юмористическом журнале, издание и чтение которого позволяет физикам отдохнуть от утомительного занятия наукой. В одном из номеров журнала «Шуточная физика для пешеходов» в 1962 году появилась статья Липкина, содержащая бездоказательное, а потому несерьезное, просто фантастическое предположение о том, что фермионы и бозоны являются близкими родственниками и даже образуют одно общее семейство. В соответствии с этим Липкин предложил особую барбарионскую, или иначе «варварскую», классификацию частиц. (По-английски здесь игра слов: «barbagon» и «barbarian», то есть «варварский».) Но через два года Липкин еще раз возвратился к возможности барбарионской классификации элементарных частиц, теперь уже в серьезном журнале, специально предназначенном для публикации коротких, но важных сообщений. Барбарионская классификация вскрывает незамеченную ранее симметрию свойств частиц. Позволяет усмотреть их глубокое родство, объединяющее в общее семейство частицы, имеющие различный спин и различное барионное число (один из параметров, характеризующий свойства тяжелых частиц).

Для наглядности представим себе группу спортсменов, построенных «в затылок» в колонну по одному, начиная с легковесов и кончая тяжеловесами. При этом группа подобрана так, что каждый вес представлен двумя спортсменами (как для соревнований по боксу или борьбе). Затем следует команда: «на первый-второй рассчитайся», и команда: «первые — шаг влево, вторые — шаг вправо». Теперь они стоят зигзагом в две колонны, слева «нечетные», справа «четные». Так единая группа оказывается ранжированной по двум

признакам: по весу и по четности. Возвращаясь к частицам, заметим, что весу спортсменов соответствует барионное число, а четности — значение спина. Частицы, имеющие одинаковое барионное число, могут иметь различные значения спина. Спин, как мы знаем, определяет принадлежность частицы к той или иной классификации. Полуцелый спин относит частицу к подсемейству фермионов и заставляет ее подчиняться статистике Ферми-Дирака. Целочисленный спин означает, что частица относится к подсемейству бозонов и подчиняется статистике Бозе-Эйнштейна. Внутри этих подсемейств обнаруживаются дальнейшие различия, ибо, как уже упоминалось, фермионы могут иметь различные «полуцелые» значения спинов ($\pm 1/2$, $\pm 3/2$, $\pm 5/2$...), а бозоны различные целые значения (0, ± 1 , ± 2 , ± 3 ...). Это приводит к реальным физическим различиям внутри двух основных подсемейств бозонов и фермионов.

Однако в микромире имеются и другие различия между частицами. Например, протон и нейтрон почти не различаются по массе, они входят в одну общую «весовую категорию». Не различаются они и спином. Нейтрон невозможно отличить от протона, не будь в нашем распоряжении электромагнитных полей. Электромагнитное поле или даже электрическое и магнитное поля, взятые по отдельности, позволяют легко отличить протон от нейтрона. Первый обладает положительным электрическим зарядом, второй электрически нейтрален. Это тоже можно пояснить моделью. Протон и нейтрон почти идентичные близнецы, но на спортсмена, изображающего протон, одет парик с длинными волосами, а тот, кто играет роль нейтрона, носит парик-лысину. В электрическом поле волосы на парике «протона» поднимаются дыбом. Лысый «нейтрон» на поле не реагирует...

Итак, барбарионскую классификацию, родившуюся как шутка, теперь рассматривают всерьез. Таким, можно сказать, было начало. Новое слово сказано в 1976 году. В физику вошло понятие суперсимметрии и новый тип алгебры, алгебры суперсимметрии, вскоре превратившейся в математический аппарат, пригодный для конкретных расчетов. Прежде чем идти по этому удивительному пути, нужно возвратиться на стартовую позицию.

Античастицы

Вся наука покоится на нескольких фундаментальных законах. Важнейшими из них являются законы сохранения. Ученые сформулировали эти законы, сопоставляя многочисленные и разнообразные наблюдения и опыты. Вопрос о том, почему эти закономерности свойственны природе, возникал многократно — человеку свойственно стремление дойти до самых глубинных основ, до понимания причины всех причин. Свойства симметрии открыли такую возможность. Оказалось, например, что главные законы, законы сохранения энергии и импульса, сохранения момента (то есть сохранения импульса вращательного движения) и некоторые другие тесно связаны со свойствами пространства, его симметрией. Если тело движется в пространстве по инерции, не испытывая действия внешних сил, его энергия не изменяется. Эта простейшая форма закона сохранения энергии вытекает из свойства однородности пространства, из его так называемой трансляционной симметрии. Не меняются свойства тела и при повороте в пространстве, ибо пространство изотропно, то есть его свойства не зависят от направлений. Значит, поворот тела в пустом пространстве, вдали от других масс, не меняет его энергии.

Симметрия пространства и времени лежит в основе теории относительности. Симметрии такого рода называются глобальными симметриями. Они одинаково охватывают все пространство, весь мир.

Но существуют и симметрии иного рода, локальные симметрии, характеризующие ограниченные области пространства. Наглядным примером является упругий резиновый шар. Поворачивая его вокруг любой оси, проходящей через центр, мы не вызываем никаких изменений. В данном случае поворот — есть преобразование, допускаемое глобальной симметрией шара. Возможны, однако, другие операции, не нарушающие сферической формы шара, но вносящие изменения, скажем, в его поверхность. Можно сместить любую точку

поверхности шара, не изменяя ее расстояние от центра. При этом сферическая форма шара не нарушится, но сетка меридианов и параллелей, нанесенная на его поверхность, исказится. Это легко себе представить и, при известной осторожности и тренировке, даже выполнить, проделав опыт с надувным резиновым шариком, предварительно нарисовав на нем сетку меридианов и параллелей. Смажем кончик пальца клеем, коснемся шарика и, подождав, пока клей подсохнет, сдвинем палец вдоль поверхности шара. Не нужно давить на нее или поднимать ее — пусть она остается сферической. Однако сетка меридианов и параллелей окажется искаженной. Палец почувствует, как резина сопротивляется этому локальному нарушению симметрии. Такое местное смещение вызывает появление упругих сил, стремящихся вернуть смещенную точку в исходное состояние. Здесь мы встретились с примером неведомого ранее рождения сил. В данном случае локальная симметрия образуется без нарушения глобальной симметрии: сферическая поверхность остается сферической. Но в месте локального нарушения симметрии появляется сила, отсутствовавшая до возникновения этого нарушения и захватывающая часть пространства.

Мы не подчеркивали раньше, сколь большую роль играли такие локальные свойства симметрии в посленьютоновском развитии физики. Для простоты мы пользовались более привычным языком. Но для дальнейшего необходимо перейти на язык симметрии и описать на нем несколько известных явлений. Локальные изменения симметрии пространства, вызванные присутствием больших масс, приводят к появлению гравитационных сил. Вот как это происходит. Пространство вдали от больших масс однородно и изотропно. Но вблизи больших масс оно теряет свою однородность и изотропность. Вместо них возникает локальная сферическая симметрия. По мере удаления от искажающей массы локальная сферическая симметрия становится все менее заметной, она ослабевает, плавно переходя в глобальную симметрию, в однородное и изотропное пространство. Именно появление локальной сферической симметрии вызывает возникновение гравитационных сил.

Иными словами, локальная сферическая симметрия пространства, вызванная присутствием некоторого материального тела, эквивалентна гравитационному полю, полю тяготения этого тела. Величина локального искажения симметрии, а значит, и сила поля тяготения пропорциональна массе этого тела. Эта величина и эта сила убывают по закону Ньютона пропорционально квадрату расстояния. Поэтому сила тяготения и локальные искажения симметрии быстро становятся очень малыми.

Так, с точки зрения симметрии, можно объяснить суть общей теории относительности.

Подобным образом можно пояснить и возникновение сил в теории Максвелла. Электрический заряд вызывает локальную симметрию — сферическую симметрию пространства, примыкающего к нему. Следствием является возникновение электростатического поля и соответствующей кулоновской силы, действующей на другие заряды. По мере удаления от рассматриваемого заряда вызванная им локальная симметрия и окружающее его поле ослабевают.

Теперь мы можем высказать гипотезу: при возникновении локальной симметрии, искажающей глобальную симметрию природы, всегда возникают соответствующие поля и связанные с ними силы. К этой гипотезе мы еще вернемся, но прежде обратим внимание на то, что понятие симметрии, позволившее по-новому осознать структуру теории Максвелла и теории относительности, не дает возможности продвинуться в понимании природы элементарных частиц. Для этого нужно идти дальше.

Эйнштейн отлично понимал, что радикальное изменение теории неизбежно. Но главное направление развития физики пошло не по пути развития теории поля, избранному Эйнштейном, а в направлении дальнейшего совершенствования квантовой механики, вероятностный характер которой казался ему сомнительным. Продвигаясь по этому направлению, физики, главным образом это были молодые ученые, добивались одного успеха за другим. Дирак первым объединил принципы квантовой механики с требованиями специальной теории относительности. Наградой ему было предсказание существования новой частицы, имевшей массу электрона и обладавшей зарядом, равным по величине заряду

электрона. Это была удивительная частица: знак ее заряда был противоположен знаку заряда электрона. Это был положительный электрон, призрак которого беспокоил еще Эйнштейна. Но этим не ограничивались поразительные свойства новой частицы. Она должна была двигаться навстречу действующей на нее силе. Лишь со временем Дирак понял, что такое свойство может быть присуще только частице с отрицательной массой.

Так в науку вошла первая античастица. Впоследствии выяснилось, что в природе существует еще один тип симметрии: симметрия частиц и античастиц. Каждой частице, имеющей спин, отличный от нуля, соответствует античастица. Античастицы обладают отрицательной массой, равной по величине положительной массе соответствующей частицы. Если частица обладает электрическим зарядом, то ее античастица имеет заряд той же величины, но противоположного знака.

По мере углубления знаний мы убеждаемся, что элементарные частицы обладают многими, ранее неизвестными нам характеристиками. И аналогичными свойствами обладают их античастицы. Все характеристические величины, определяющие свойства элементарных частиц и их античастиц, принято называть их квантовыми числами. Если частица не обладает данной характеристикой, то для нее соответствующее квантовое число равно нулю. Величины, характеризующие микрочастицы, меняются только скачками (квантами). Наименьшая величина такого скачка принята равной $1/2$ и может быть как положительной, так и отрицательной. С этим мы уже знакомы.

При встрече частицы с ее античастицей обе они исчезают, аннигилируют, порождая при этом другие частицы. Например, при встрече электрона с его античастицей — позитроном вместо них возникают два фотона. Здесь мы встречаемся с предсказанным теорией относительности слиянием двух законов сохранения — закона сохранения энергии и закона сохранения вещества — в единый закон сохранения. Ведь при аннигиляции электрона и позитрона их масса покоя исчезает (фотоны не имеют массы покоя) и полностью переходят в энергию фотонов. Эта энергия эквивалентна сумме масс покоя аннигилирующих частиц и энергии их движения. Процесс аннигиляции заряженных частиц происходит в полном соответствии с законом сохранения электрического заряда. Например, при аннигиляции электрона и позитрона их заряды исчезают не по отдельности, а вместе. Сумма их зарядов (положительного и отрицательного) в точности равна нулю, равны нулю и заряды рождающихся фотонов. Суммарный заряд остается неизменным — как до аннигиляции заряженных частиц, так и после нее. Сейчас ученым известны не только элементарные античастицы, но и антиатомы, например, атомы антиводорода. Обнаружить эти реалии в природе не удалось — их синтезируют в лаборатории. Ядром атомов антиводорода служит отрицательно заряженный антипротон. Роль электрона в таком атоме играет позитрон.

Двуличность элементарных Частиц

Квантовая механика, созданная для познания свойств микромира, оказалась бессильной ответить на самые насущные вопросы: почему существуют именно такие микрочастицы, какие мы наблюдаем, почему они обладают именно такими, известными нам из опыта, значениями массы и заряда? Теория была вынуждена принять частицы и их характеристики как факт. Затем уже она могла «строить» из них атомы и молекулы, вычислять их свойства, например, закономерности спектров, силы, удерживающие электроны на орбитах и объединяющие атомы в молекулы, и многое другое. В этом смысле квантовой механике присущи черты феноменологической теории, в уравнения которой входят постоянные, определяемые непосредственно из опыта.

При попытке вычислить энергию электрона квантовая механика приводила к бесконечно большим величинам. Однако бесконечно большая энергия, как показывает теория относительности, соответствует бесконечно большой массе, что никак не совместимо с опытом, дающим вполне определенное значение массы электрона. Такие бесконечности возникали в квантовой механике во многих случаях. Чаще всего, как в задаче о собственной энергии электрона, они появлялись вследствие того, что частицы, в том числе и электроны, выступают в квантовых теориях как точечные образования, не имеющие размеров, а при

расчетах одновременно применялись методы новой, квантовой физики и старой — классической.

Для того чтобы избежать противоречащих опыту бесконечных величин, требовалось радикальное изменение теории. Мобилизуя все возможные способы, используя все лазейки, которые можно было отыскать в старых теориях, и отваживаясь на попытки, не имеющие прецедентов в прежней практике, ученые ухитрились проникать все глубже и глубже в твердь микромира, а точнее — в его «зыбкость». Первого успеха добилась квантовая электродинамика — теория, объединившая то, что казалось непримиримым: свойства электромагнитного поля с квантовой структурой вещества и энергии. Можно сказать, что это примирение основано на компромиссе. Одной из опор служит ощущение гармонии, симметрии между частицами и полями, осознание того, что изменение одного влечет за собой определенное изменение другого. Осознание их кровной связи, их единой природы. Симметрия частиц и поля и стала путеводной, нитью в поисках единой судьбы мира.

Подобная идея привела японского физика Юкаву к созданию теории ядерных сил — поразительной основополагающей теории, роль которой можно уподобить роли одного из китов, на которых держится мир. Юкава предположил, что протоны и нейтроны внутри ядра удерживаются полем, порождающим чрезвычайно большие силы, если расстояния между частицами меньше диаметра ядра. Причем эти силы очень быстро убывают при увеличении расстояния за пределы ядра. Для того чтобы поле обладало этими свойствами, нужно, чтобы его кванты были очень отличны от квантов электромагнитного поля — фотонов. Фотоны движутся со скоростью света и не могут двигаться с другой скоростью. Их масса покоя равна нулю. Поэтому электромагнитное поле действует на очень больших расстояниях, конечно, с увеличением расстояния его действие постепенно ослабевает. Расчеты показали Юкаве, что именно обеспечивает известные свойства ядерных сил, обладающих большой величиной в пределах ядра и быстро убывающих за его пределами: квантами этого поля должны быть особые частицы с массой, примерно в 300 раз превышающей массу электрона. Когда Юкава предсказал эти частицы, ни один опыт не намекал на их реальное существование. Но эти частицы, названные мезонами (промежуточными, так как величина их массы расположена между массами электрона и протона), впоследствии были обнаружены на опыте. Обладая массой покоя, они, конечно, не могут двигаться со скоростью света. Это и обеспечивает чрезвычайную малость зоны действия ядерных сил. Позже эти частицы получили наименование пи-мезонов, ибо были открыты и другие частицы, входящие в семейство мезонов.

Сравнение свойств протона и нейтрона, сильно отличающихся зарядом (заряд протона +1, заряд нейтрона 0) и мало отличающихся по массе (нейтрон лишь на 0,13 % тяжелее протона), заставило ученых задуматься: не существует ли еще одна, дотоле неведомая симметрия, объединяющая микрочастицы в своеобразные группы?

Успех теории ядерных сил дал новый толчок развитию науки. Предстояло объяснить несколько фактов, обнаруженных экспериментаторами, но оставшихся непонятными. Было, например, установлено, что частицы, возникающие за очень короткое время в результате сильных ядерных взаимодействий, затем могут через очень длительное время самопроизвольно распасться без всяких видимых причин. Для объяснения этого и некоторых других фактов пришлось предположить существование еще одного типа сил, получивших наименование слабых, ибо они в 100 000 раз слабее тех, которые ответственны за взаимодействия ядерных частиц, и примерно в 1000 раз слабее сил электромагнитного взаимодействия.

Стабильность большинства ядер, состоящих из протонов и нейтронов, приводит к заключению о том, что сами протоны и нейтроны столь же устойчивы. Однако наблюдения над свободными нейтронами показали, что это не так. В среднем через пятнадцать минут свободный нейтрон распадается, порождая протон, электрон и нейтрино. В некоторых неустойчивых ядрах аналогичные распады наблюдаются и внутри ядра. Этот процесс, называемый бета-распадом, состоит в том, что из ядра вылетает электрон, а положительный

заряд ядра увеличивается на единицу. При этом баланс энергии и импульса, измеренный со всей тщательностью, не сходится. Энергия и импульс первоначального ядра оказываются больше, чем сумма энергии и импульса дочернего ядра и электрона. Убеждение в необходимости соблюдения законов сохранения энергии и импульса привело в этом случае к предсказанию существования нейтрино, неизвестных ранее незаряженных частиц, уносящих недостающую энергию и импульс. Впоследствии нейтрино были обнаружены.

Устойчивость ядер и устойчивость нейтронов внутри большинства ядер обеспечивается сильными ядерными взаимодействиями. Распад нейтрона вызывается слабыми взаимодействиями. Они проявляются в полной мере лишь внутри ядерных частиц, вне — чрезвычайно слабы. Даже внутри нейтрона они в 1000 раз слабее электромагнитных взаимодействий. Однако недавно удалось обнаружить, что эти силы действуют и в масштабах атома. Все это, вместе взятое, позволило ученым рассматривать протоны и нейтроны как два варианта одной и той же ядерной частицы — нуклона.

Это могло бы показаться чистой мистикой, не будь столь парадоксальное утверждение основано на реальном фундаменте многочисленных экспериментов. Нуклон, эта двуединая частица, выступает под единой личиной только внутри ядер атомов более тяжелых, чем водород. Внутри ядер электрический заряд не принадлежит отдельным протонам. Он полностью коллективизирован. Можно представить себе, что ядро является каплей нуклонной жидкости, удерживаемой вместе действием ядерных сил, проявляющихся в том, что отдельные нуклоны постоянно обмениваются между собой пи-мезонами. При этом электрические заряды покидают отдельные протоны и оттесняются к поверхности капли.

При ядерных реакциях некоторые частицы покидают ядро. Самые легкие из свободных частиц, имеющих положительный заряд — позитроны — являются античастицами электронов и в земных условиях очень быстро гибнут, встречаясь и аннигилируя с электронами. Самые простые из ядерных частиц, имеющие единичный положительный заряд, оказываются протонами. Их ядерные близнецы, не имеющие заряда, называются нейтронами. Разница между ними может быть обнаружена только при помощи электромагнитных взаимодействий. Нейтроны не реагируют ни на электрическое, ни на магнитное поля, ни на электромагнитные волны. Протоны притягиваются или отталкиваются электрическими зарядами, в соответствии с их знаком, их путь искривляется в магнитном поле, на них можно воздействовать электромагнитными волнами. Правда, эти различия можно обнаружить, лишь когда протон и нейтрон свободны, то есть находятся вне ядер, вне действия ядерных сил, в сто раз превосходящих по величине электромагнитные силы.

Так была установлена еще одна симметрия природы, названная изотопической симметрией. Она объединяет между собой протон и нейтрон, позволяя рассматривать их как единую частицу — нуклон. Нуклон обладает изотопической симметрией, электромагнитное поле нарушает изотопическую симметрию. Электромагнитное поле обнаруживает, является ли данный нуклон протоном или нейтроном. Если электромагнитного поля нет, то разница меж-междуними исчезает. Можно сказать лишь, что это нуклон. Итак, гипотеза о существовании в природе нового типа взаимодействия — слабого взаимодействия — подтверждена опытом. Не следует, однако, думать, что слабое взаимодействие разрушает нейтрон, что нейтрон состоит из протона, электрона и нейтрино. Нет, нейтрон так же элементарен, как протон, но слабые взаимодействия приводят к перерождению нейтрона в три отдельных частицы, причем 0,13 % массы нейтрона превращается при этом в массу покоя электрона и в энергию движения новорожденных частиц.

Что значит быть родственниками?

Развивая идею Юкавы о поле ядерных сил и о частицах, реализующих действие этого поля, можно сказать, что слабые взаимодействия тоже связаны с существованием особого поля. Можно и оценить массу частиц, реализующих это поле. Что нужно учесть при этой оценке? Слабые взаимодействия в 1000 раз слабее электромагнитных. Они и убывают

быстрее по мере увеличения расстояния. Нужно принять во внимание также, что масса частиц, представляющих поля, пропорциональна квадратному корню из отношения сил этих полей. Так ученые получили, что масса частиц поля слабого взаимодействия примерно в 30 раз больше массы протона или нейтрона. При этом спин такой частицы должен быть целым числом, то есть она должна подчиняться той же статистике Бозе — Эйнштейна, которой подчиняются фотоны — частицы, реализующие электромагнитные взаимодействия.

Предсказанные свойства новых частиц обнаружили их глубокое родство с фотонами. Естественно, возник вопрос: не принадлежит ли новая частица к тому же семейству, что и фотон? Нет ли общности между электромагнитными и слабыми взаимодействиями? Прежде чем приняться за объяснение сходства, необходимо понять причину и значение различия между новой частицей и фотоном. Главные различия в их массе. Вся масса фотона обусловлена переносимой им энергией. Он летит со скоростью света и не может изменить своей скорости, его масса покоя равна нулю. Масса покоя новой частицы равна 30 массам нуклона, она очень велика. Могут ли столь различные частицы быть родственниками?

Все ранее известные теории элементарных частиц дали бы решительный отрицательный ответ. Но теория симметрии, на основе фактов, известных в других областях физики, позволила подойти к этому вопросу глубже. Она столкнула ученых с невиданным ранее эффектом, с одним из самых мистических сюрпризов микромира. Оказалось, что один из видов нарушения симметрии — спонтанное нарушение — может придать массу частице, не имеющей массы...

Однако что такое спонтанное нарушение симметрии? Самый наглядный пример спонтанного нарушения симметрии можно увидеть за круглым банкетным столом, все места за которым заняты. Между присутствующими лежат салфетки. Картина расположения салфеток на столе совершенно симметрична. Рядом с любым человеком, справа и слева от него, лежит по салфетке. Но симметрия спонтанно нарушается, как только один из присутствующих возьмет салфетку. Он может взять любую, справа или слева. Однако теперь все должны брать салфетки с той же стороны. Если кто-нибудь поступит иначе — он оставит одного из присутствующих без салфетки, хотя не рядом с ним останется лишняя. Теперь зачастую кладут салфетки на тарелку, стоящую перед каждым посетителем, так что симметрия не может быть нарушена.

Нечто похожее (не внешне, а по существу) наблюдается в куске железа. Каждый атом железа ведет себя как маленькая магнитная стрелка. Тепловые колебания заставляют атомы принимать все возможные ориентации в пространстве, поэтому их магнитные поля ориентированы симметрично во всех направлениях и компенсируют друг друга. Такой кусок железа не обладает свойствами магнита. Но если температура падает, множество соседних атомов могут вдруг ориентировать свои магнитные поля в одинаковом направлении. Возникает спонтанное намагничивание отдельных частей куска железа. Иногда это спонтанное намагничивание может распространиться по всему куску. Тогда весь кусок железа станет магнитом.

Родственный процесс спонтанного нарушения симметрии электромагнитного поля, а следовательно, и состояний электронов внутри металла при понижении температуры, приводит к одному из поразительнейших явлений — явлению сверхпроводимости. Обычно в металлах часть электронов свободна, они движутся внутри металла, как атомы газа в сосуде, каждый независимо от других. Электроны имеют спин $1/2$, подчиняются статистике Ферми — Дирака и соответствующим правилам запрета. Когда температура падает ниже определенной критической температуры, электроны внезапно группируются попарно так, что их спины оказываются скомпенсированными. Эти пары ведут себя совсем иначе. Каждая пара выступает как своеобразная частица — квазичастица — со спином, равным нулю, поэтому они подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Все пары ведут себя одинаково, и ни одна из них не может выделиться из коллектива. Они ведут себя не как газ свободных частиц, а как единая сущность, как своеобразная сверхтекучая жидкость, льющаяся сквозь металл, не взаимодействуя с его решеткой. Так возникает явление сверхпроводимости:

сверхтекучая жидкость, состоящая из электронных пар, течет в металле, не испытывая сопротивления, не теряя энергию. Электрический ток в сверхпроводнике может течь вечно, не расходуя энергию. Это поразительное явление долго оставалось тайной, пока за разгадку не принялась квантовая теория.

В сверхпроводнике электроны оказываются связанными в пары, как дети, перебрасывающиеся мячом. Мяч не позволяет им разойтись слишком далеко. Для электронов этим мячом являются фотоны, которыми они обмениваются в процессе взаимной компенсации своих спинов. Этот процесс напоминает компенсацию спинов электронов при соединении двух атомов водорода в молекулу. В обоих случаях компенсация спинов осуществляется путем обмена фотонами.

Спонтанное изменение симметрии электромагнитного поля приводит не только к спариванию электронов и переходу металла в сверхпроводящее состояние, но вызывает еще одно поразительное следствие: фотоны, реализующие это поле, приобретают массу. В недрах металла рождается нигде ранее не виданная материя! Этот удивительный факт подтверждается тем, что магнитное поле может проникнуть в глубь сверхпроводника только на очень малую глубину. Попытка втолкнуть его внутрь сверхпроводника увеличением напряженности магнитного поля приводит к восстановлению симметрии внутреннего электромагнитного поля металла и разрушению сверхпроводимости. Так ученые столкнулись с невообразимым фактом: спонтанное изменение симметрии поля способно сообщить массу покоя частицам, лишенным такой массы в обычных условиях!

В 1961 году Глэшоу первым попытался использовать это при построении теории элементарных частиц. В 1967 году Вайнберг создал первую теоретическую модель, в которой слабые и электромагнитные взаимодействия объединены в определенную симметричную систему, а различия между ними вызваны спонтанным нарушением этой симметрии. При этом он основывался на работе Хиггса, который еще за три года до того показал, что спонтанное нарушение симметрии может приводить к изменениям масс различных частиц, как это происходит с фотоном при возникновении сверхпроводимости. Через несколько месяцев подобную гипотезу независимо высказал Салам, теперь ее обычно называют моделью Вайнберга — Салама.

Только в 1977 году три различные группы экспериментаторов, одна в Швейцарии (в работе участвовало 55 ученых) и две в США, довели до бесспорного результата начатые в 1973 году наблюдения, доказывающие существование кванта поля слабых взаимодействий — промежуточного векторного бозона. Название получилось сложным, ибо оно должно было характеризовать свойства гипотетической частицы: «промежуточный» означает, что она имеет массу покоя, величина которой лежит между массами нуклонов и очень тяжелых частиц гиперонов. «Векторный бозон» означает, что частица родственна фотону, то есть обладает целочисленным спином и подчиняется статистике Бозе — Эйнштейна.

Огромное значение этих опытов состоит в подтверждении глубокого родства между слабыми и электромагнитными взаимодействиями, двумя из четырех фундаментальных сил, образующих все многообразие известного нам мира. В 1979 году заслуги Глэшоу, Вайнберга и Салама, объединивших слабые и электромагнитные взаимодействия, были отмечены Нобелевской премией.

Недавно астрофизики нашли еще одно подтверждение единства электромагнитных и слабых взаимодействий. Симметрия, объединяющая поле, порождающее эти взаимодействия, позволила понять процессы, приводящие к возникновению «сверхновых» звезд. Появились надежды на то, что спонтанное нарушение симметрии, приводящее к различию слабых и электромагнитных взаимодействий, позволит вычислить, то есть указать механизм, приводящий к тому, что масса нейтрона на 0,13 % превышает массу протона.

Эти вдохновляющие успехи снова возродили веру, восходящую к Эйнштейну, веру в то, что удастся создать единую теорию всех полей, существующих в природе.

Ищите гравитоны!

Сейчас мы можем полностью присоединиться к предсказанию Эйнштейна о том, что существование элементарных частиц должно вызвать радикальную перестройку теории тяготения (общей теории относительности). Мы должны признать и то, что Эйнштейн не сумел реализовать это из-за глубокого предубеждения против вероятностной трактовки квантовой механики, казавшейся ему временным промежуточным этапом ее развития. Окончательный приговор вынесет будущее. Но сейчас другого пути нет, и к этой ситуации полностью относятся слова Эйнштейна, написанные им по другому поводу: «В свете уже достигнутых результатов счастливо найденное кажется почти само собой разумеющимся и любой толковый студент усваивает теорию без большого труда».

Теория поля тяготения, развитая Эйнштейном в форме общей теории относительности, предсказавшая отклонение света вблизи Солнца, красное смещение в звездных спектрах и запаздывание радиосигналов, проходящих около Солнца, объяснившая аномалию движения Меркурия, останется навсегда в фундаменте науки о макром мире. Для применения к микромиру она нуждается в дальнейшем развитии, аналогичном тому, которое превратило классическую электродинамику Максвелла в квантовую электродинамику. Прежде всего нужно попытаться конкретизировать свойства гравитонов — частиц, реализующих действие гравитационного поля, то есть сделать то, что сам Эйнштейн произвел для электромагнитного поля, постулировав существование его квантов-фотонов и показав связь между их энергией и длиной волны или частотой света. Предсказав существование гравитонов, необходимых для того, чтобы излучение гравитационных волн не разрушило атомы, Эйнштейн не сделал попытки установить свойства этих частиц.

Гравитоны еще никто не наблюдал. Это очень трудная задача, и нельзя сказать, когда она будет решена. Но основные свойства гравитонов уже известны, а многие можно предугадать. Давайте рассуждать. Поле тяготения действует на больших расстояниях. Значит, гравитоны подобно фотонам не имеют массы покоя и движутся со скоростью света. Их спин должен быть равным целому четному числу, потому что нечетный целочисленный спин приводит к взаимному отталкиванию, а гравитация дает только притяжение. Спин, равный нулю, исключается, иначе гравитоны не могли бы вызвать отклонения фотонов вблизи тяжелых масс, а отклонение света вблизи Солнца подтверждено опытом. Может быть, спин гравитона равен 2? Правдоподобно. Двойка — наименьшее простейшее четное число, значит, следуя мысли Ломоносова, нужно остановиться на ней, чтобы не вызывать излишних осложнений. Это предположение удовлетворяет всем опытным фактам, и нет оснований отказываться от него до открытия опровергающих фактов.

Зная основные свойства гравитонов, теоретики могут пойти и противоположным путем. Построив последовательную квантовую теорию поля, в которой гравитационные силы реализуются безмассовыми частицами со спином 2, они приходят к общей теории относительности Эйнштейна. При этом сила тяготения, сила инерции и центробежная сила возникают в результате локального нарушения симметрии пространства, вызванного присутствием вещества, ускорением или вращением тел относительно всех остальных масс Вселенной.

Дальше в игру включается идея суперсимметрии, объединяющей бозоны (фотоны, гравитоны и другие частицы и античастицы, имеющие целочисленный спин) с фермионами (электронами, протонами, нейтронами и другими, а также их античастицами, имеющими полуцелый спин). Суперсимметрия объединяет, например, бозон со спином 1 в одну суперчастицу вместе с фермионами, имеющими спин $1/2$ и $3/2$ — Подобные рассуждения привели ученых к мысли о необходимости и неизбежности существования партнера гравитона. Он получил наименование «гравитино». (Маленький гравитон или, по-итальянски, гравитончик). Гравитино, как и гравитон, еще не удалось наблюдать. Обнаружить его очень трудно, ибо соответствующие ему силы тяготения заметны только на микроскопических расстояниях.

Так, глубокие раздумья позволили ученым обнаружить общность в свойствах

различных частиц там, где без привлечения понятия симметрии все казалось разрозненным и чуждым. Отыскивая и находя симметрию свойств ряда частиц, ученые смогли сгруппировать микрочастицы в семейства наподобие того, как Менделеев сделал это с химическими элементами. Удалось предсказать свойства ряда неизвестных частиц, которые затем были обнаружены. Так было предсказано существование суперэлементарных частиц — кварков и глюонов, — частиц поля, объединяющего кварки в тяжелые частицы — нуклоны и мезоны.

Многие ученые считают, что с существующим набором частиц уже сегодня можно получить нечто подобное таблице Менделеева: разместить в некую единую систему частицы, которые мы теперь считаем элементарными, и оставить место для еще не открытых. На звание элементарных частиц, кроме гипотетического гравитона и гравитино, — частиц, которых пока никто не наблюдал, но в существовании которых не следует сомневаться, претендуют электрон, мюон, несколько типов нейтрино, недавно открытые родственники электрона и мюона — тяжелые лептоны, — и кварки, из которых состоят протон, нейтрон и другие тяжелые частицы.

Из известных частиц пока лишь мюон не находит себе места в классификации элементарных частиц новой теории. Не решен в ней и вопрос об элементарности промежуточного векторного бозона.

Известны и другие варианты «таблиц Менделеева» — обобщенных теорией суперсимметрии. В них «помещается» меньшее количество элементарных частиц. Какая из теорий ближе к реальности — еще не известно. Все они симметричны. Если внутренняя симметрия, объединяющая в них частицы с одинаковыми спинами, является локальной, то теория приводит к появлению фундаментальных сил. Так, в принципе, возникает теория, объединяющая гравитацию с электромагнитными, слабыми и сильными взаимодействиями. Когда такая принципиальная возможность будет реализована и воплощена в математических формулах, сбудется главная мечта Эйнштейна и осуществится главная цель физики: родится единая теория поля, в которой могут найти место все большие и малые тела Вселенной — галактики и пылинки, внегалактические космические миры и элементарные кирпичики мироздания. Так, возможно, родится теория — ясная, прозрачная, доступная пониманию даже ребенка, как писал об этом исследователь природы, равного которому тюка не дало человечество.

А пока теория суперсимметрии и ее обобщения не завершены. Еще не удалось получить математического описания процессов спонтанного нарушения суперсимметрии. Ни для одной из «элементарных» частиц, входящих в эту теорию, не удалось вычислить массу покоя. Но многие реальные элементарные частицы, несомненно, обладают ею. Поэтому, чтобы теория суперсимметрии вошла в арсенал науки, необходимо выразить ее в уравнениях, способных описать спонтанные нарушения суперсимметрии и дать возможность вычислить возникающие при этом массы частиц.

Применение идеи суперсимметрии привело к созданию непротиворечивой теории гравитации, получившей название супергравитации. Она пока не позволила сделать новых предсказаний, поэтому не может быть ни подтверждена, ни опровергнута опытом. Однако к теории супергравитации следует отнестись с полным вниманием потому, что она допускает дальнейшее обобщение. Все это открывает надежду на реализацию самой заманчивой мечты — объяснение того, почему существуют именно те элементарные частицы, которые мы знаем.

Теории супергравитации и суперсимметрии все время совершенствуются. Параллельно с ними развиваются другие теории, тоже основанные на идее единства природы и ее симметрии. Эти теории возникли для объяснения многочисленных закономерностей свойств микрочастиц, которые обнаруживаются во все возрастающем количестве экспериментов. Ученые уверены — эти закономерности не случайны. Но выявить связь между ними пока не удастся. Картина природы становится все более сложной и запутанной. Так бывало перед очередным радикальным прорывом к истине...

Впереди еще долгий путь. Идущие по нему полны надежд. Их не пугают неизбежные

трудности, они готовы к разочарованиям, но уверены в конечном торжестве науки, к которому ведет бесконечное число шагов...

ХИМЕРЫ КОСМОСА

Весть о рождении Вселенной

Мы подошли к моменту истории, когда стало возможно провести уникальный, неслыханный по своей дерзости и отваге мысленный опыт. Опыт, которому нет аналога в истории человеческой мысли. Опыт, который символизирует неограниченные возможности человеческого разума. Опыт, который легко можно было бы счесть цирковым номером, обманом ловкого иллюзиониста, если бы этот мысленный эксперимент в каждой детали, в каждой мелочи не был исчерпывающе аргументирован.

В этом эксперименте, как в фокусе, скрестились все лучи человеческих знаний в самых различных областях: в учении о движении, об электрических и магнитных явлениях, все откровения квантовой теории материи и парадоксальные утверждения теории относительности. Оказались мобилизованы все наши знания о противоречивой фактуре элементарных частиц, законах их взаимодействий. Все слилось в едином интеллектуальном напряжении — и человек мысленным взором проник на край бытия, представил и рассчитал до мгновения акт рождения мира.

Современный взгляд на происхождение Вселенной разрабатывали ученые разных стран: советский физик-теоретик академик Зельдович, ученые Хойл и Тайлер из Великобритании и другие. Первый решающий шаг сделали Гамов, Альфер и Херман в США. Они набросали исходный вариант сценария развития Вселенной, в начале которого все вещество, вся энергия были сосредоточены в очень малом объеме. Все началось с Большого взрыва, в ходе которого сверхплотная и сверхгорячая материя начала расширяться, увлекая с собой пространство. Они же предсказали существование древнего свидетеля первых мгновений творения мира. Этот свидетель — реликтовое излучение (*relictum*, латинское — остаток), которое, сохранившись от Большого взрыва, должно равномерно пронизывать космос. Как это, к сожалению, бывает в науке, никто не обратил внимания на их предсказание.

Можно представить себе нетерпение читателя: обнаружен ли этот свидетель? Подтвердил ли он фантастические домыслы физиков?

Тут в наше повествование вторгаются радиоастрономы со своими проблемами, которые, казалось бы, не имели никакого отношения к проблемам теоретической физики, но логика науки диктует свои законы...

В 1965 году радиоастрономические наблюдения позволили Пензиасу и Вилсону открыть удивительное излучение, приходящее к Земле со всех сторон с одинаковой интенсивностью. Задачей исследователей было изучение шумов, приходящих из космоса в диапазоне сантиметровых волн, избранном для создания систем связи при помощи искусственных спутников Земли. Нужно было узнать характер ожидаемых шумов, распределение их источников по небосводу, интенсивность. Одновременно проводилось изучение свойств большой рупорной антенны, при помощи которой предполагалось проводить радиоастрономические исследования на волне 21 см — на этой волне «поют» атомы космического водорода. Вначале исследования проводились на волне 7,35 см.

Радиоастрономы в то время уже привыкли оценивать величину шумов своих приемников и антенн при помощи эквивалентной температуры идеального сопротивления, нагревание которого порождает такой же шум. Так в науку вошел термин «шумовая температура». По этой оценке шумовая температура их антенны составила всего 0,9К (градусов Кельвина). Шумовое излучение атмосферы добавляло на волне 7,35 см еще 2,3К.

Мы акцентируем внимание читателя на этих цифрах, так как именно из-за совсем

крошечной неувязки в числах, показавшейся сначала ошибкой, было сделано одно из самых важных открытий всех времен. Измерения давали 6,7 К. Избыток, величиной в 3,5 К, был достоверно установлен с погрешностью не более $\pm 1,0$ К. Для того чтобы обеспечить такую точность, пришлось выселить из антенны пару гнездившихся в ней птиц и тщательно очистить от их помета внутреннюю поверхность антенны. Избыток шума оставался постоянным независимо от времени суток и не претерпевал сезонных изменений. В течение всех наблюдений антенна оставалась постоянно направленной в зенит так, что, вращаясь вместе с Землей, она постепенно «прослушивала» обширную часть небесного свода. Создавалось впечатление, что антенна и сама Земля купаются в потоке радиоизлучения, наполняющем Вселенную. Потоке, не имевшем определенного источника, приходящем и с тех направлений, где ни оптические, ни радиотелескопы не фиксировали никаких небесных объектов. Казалось, что излучает само пространство, независимо от наличия в нем каких-либо тел.

Подобного еще не наблюдали ни в одном из освоенных участков диапазона электромагнитных волн. Вспомним, что одно из возражений против бесконечности размеров и против стационарности Вселенной, содержащей бесконечное количество звезд, сводилось к тому, что в этом случае небосвод должен был бы казаться светящимся суммарным светом этих бесчисленных звезд. Это возражение названо парадоксом Ольбертса, по имени астронома, впервые задумавшегося над тем, почему яркость небосвода и днем и ночью не равна яркости солнечного диска.

Убедившись в том, что они действительно обнаружили излучение, приходящее из космоса и не изменяющее своих свойств ни со временем, ни с направлением на небосводе, и не находя никакого объяснения этому феномену, Пензиас и Вилсон обратились к астрофизикам. При определении диагноза сработала цепочка совпадений, которые некоторые исследователи склонны отнести за счет случая, а другие считают закономерным результатом разветвленных связей, свойственных современной науке. Подобные связи нередко называют «незримыми колледжами», подчеркивая этим сотрудничество ученых, работающих в различных организациях, а иногда на различных континентах.

Началось с того, что Пензиас, сотрудник фирмы Белл, позвонил по телефону знакомому радиоастроному Бурку, работавшему в Массачусетском технологическом институте, по вопросу, не связанному с шумами антенны. Но Бурк знал о работе Пензиаса и спросил его о том, как движутся измерения шумов. Ответ гласил: хорошо, но есть некоторые неясности — избыточный шум, источник которого неизвестен. Тогда Бурк рассказал о том, что его коллега Туркер из института Карнеги слышал доклад молодого теоретика из Принстона Пиблса о том, что должно существовать шумовое излучение, оставшееся от ранней эпохи развития Вселенной, что оно должно иметь температуру около 10 К и приходить равномерно со всех сторон. Бурк сказал, что принстонские теоретики могут прояснить сомнения Пензиаса и Вилсона. Пензиас позвонил в Принстон физику Дике. Оказалось, что незадолго до того Пиблс, один из сотрудников Дике, исходя из теоретического исследования следствий нестационарного решения уравнений общей теории относительности, полученного еще в 1922 году Фридманом, пришел к выводу о том, что на ранней стадии своего развития Вселенная должна была быть заполнена электромагнитным излучением. Это излучение должно было находиться в равновесии с веществом и препятствовать синтезу гелия и более тяжелых ядер из первоначальной массы протонов и нейтронов. Ведь и сейчас протоны составляют примерно три четверти всего вещества Вселенной. Теория предсказывала, что спектр этого излучения должен быть спектром излучения черного тела, а его температура должна падать по мере расширения Вселенной, предсказанного Фридманом. Дике предложил своим сотрудникам Роллу и Уилкинсону проверить расчеты Пиблса опытным путем. Они начали готовить антенну и приемник, предназначенные для работы на волне 3,2 см. Но звонок Пензиаса известил их о том, что они опоздали. Открытие уже свершилось.

После тщательного сопоставления опыта и теории и уточненных расчетов в

Астрофизический журнал были направлены две статьи. Статья Дике, Пиблса, Ролла и Уилкинсона под названием «Излучение черного тела из космоса» напечатана в 1965 году на странице 414 этого журнала. На странице 419 того же номера можно увидеть статью Пензиаса и Вилсона «Измерение избыточной температуры антенны на 4080 МГц».

В 1978 году, когда выдающееся значение наблюдений Пензиаса и Вилсона, подтвердивших реальность гипотезы Большого взрыва, вытекающей из решения Фридмана, было в достаточной мере осознано, они стали лауреатами Нобелевской премии. Но в 1965 году еще предстояло убедиться в том, что спектр излучения, приходящего со всех сторон на Землю, действительно совпадает со спектром черного тела. Совпадение измеренной температуры с расчетной на одной длине волны казалось недостаточным. Нужно было повторить измерение еще по крайней мере на одной длине волны. Ролл и Уилкинсон сделали это. Результат, полученный на волне 3,2 см, совпал с тем, что должно быть для черного тела, нагретого примерно до 3 К. За истекшее время диапазон длин волн, использованных для измерений этого излучения, был существенно расширен от «средних» радиоволн с длиной волны около 300 м до гамма-лучей, хотя этот обширный диапазон изучен далеко не сплошь. Но и тех наблюдений, которые уже получены, достаточно, чтобы подтвердить наличие изотропного излучения, соответствующего излучению черного тела, нагретого до трех градусов выше абсолютного нуля.

Гипотеза Большого взрыва, как уже сказано, является следствием нестационарного решения уравнений общей теории относительности, полученного Фридманом. В соответствии с его решением Вселенная непрерывно расширяется, причем скорость увеличения взаимных расстояний космических объектов тем больше, чем дальше объекты находятся один от другого. Начальная стадия процесса соответствует огромной концентрации материи и излучения в малом объеме. Такое состояние неустойчиво, и Вселенная вышла из него взрывоподобно.

Полная теория эволюции Вселенной теперь разработана достаточно детально для периода времени от 0,01 секунды после Большого взрыва до наших дней и на многие миллиарды лет вперед. Она хорошо обоснована астрономическими и радиоастрономическими наблюдениями, подтвердившими огромные скорости разбегания галактик.

Великая симметрия

Еще в 1973 году Глэшоу и Джорджи предложили теорию, которая позволяет приступить к анализу событий, происходивших после того момента времени, который отстоит на ничтожную долю секунды от начала Большого взрыва. Эта теория еще не завершена, однако она уже позволила сделать ряд предсказаний, хорошо согласующихся с опытом. Непосредственная задача, привлекавшая ученых, по существу, совпадала с мечтой Эйнштейна: создать теорию, которая объединяла бы в единое целое все известные поля, все силы, действующие в природе, теорию, способную объяснить, почему известные нам частицы обладают теми свойствами, которыми они обладают, и предсказать свойства еще неизвестных частиц. Более конкретно это звучало так — свести все известные поля и силы к единому полю, порождающему эти силы, объединить все частицы в единое упорядоченное семейство, построить аналог таблицы Менделеева для частиц.

Теория Глэшоу и Джорджи открывает путь к объединению описания микромира и Вселенной. Эта теория основана, в существенной мере, на понятии «симметрия», используемом в самом широком смысле. В этой книге мы не раз встречались с различного рода проявлениями симметрии.

Сейчас мы еще раз призовем ее на помощь, чтобы убедиться в том, что единство природы простирается от колоссальных масштабов Вселенной до мельчайших элементарных частиц. Убедиться, что законы Природы едины, хотя в зависимости от конкретных условий решающую роль играют не все сразу, а лишь часть из них, в то время как другие отступают

на второй план, чтобы выдвинуться вперед при других условиях.

Все примеры проявления симметрии, встречавшиеся на нашем пути, свидетельствуют о том, что повышение температуры, усиление хаотичного теплового движения приводят к разрушению порядка, к устранению особых свойств, проявляющихся в нарушении симметрии. Чем выше температура, тем совершеннее симметрия, тем менее вероятны устойчивые отклонения от симметрии.

Современный взгляд на развитие Вселенной состоит в том, что первоначальная температура исходного образования была столь высокой, что это образование являло собой высшую возможную в природе степень симметрии. Каково содержание этих слов?

Сильно огрубляя картину, можно сказать так: первоначальная температура была столь велика, что вся материя и эквивалентная ей энергия представляли однородное образование, а все известные силы природы сравнивались между собой по величине своего действия и слились в единую силу. Если и была среди них «самая сильная», то это, по-видимому, гравитация, та, которая является самой слабой из известных сил, действующих в современном мире. Причиной этого является огромная плотность первичной материи и энергии, много большая, чем плотность нейтронных звезд. Более того, в связи с основными положениями общей теории относительности — теории гравитации, можно, так же огрубляя, сказать, что все пространство в то время было сосредоточено в области, заполненной этой сверхплотной сверхгорячей материей. Вне этой области не было ничего — ни материи, ни пространства.

В том изначальном состоянии, с которого начался Большой взрыв, вся Вселенная была сжатой до таких малых размеров, а ее температура достигала столь высоких значений, что даже протоны и нейтроны не могли сохраняться как целое, а составляющие их сверхэлементарные частицы — кварки — теряли последнюю симметрию своего взаимодействия, что позволяло им сблизиться еще ближе, чем тогда, когда они образуют тяжелые частицы.

Именно так объясняется колоссальное увеличение плотности материи и энергии в изначальные мгновения. Все объединилось в исходный период — материя, энергия, пространство. При этом понятие «пространство» включает в себя и время, ибо это четырехмерное «пространство — время» теории относительности.

По причине, нам неизвестной, это исходное и сверхсимметричное состояние неустойчиво. Мир выходит из него, спонтанно (самопроизвольно) расширяясь. При этом увеличение размеров пространства тесно связано с расширением содержащейся в нем материи и энергии. Плотность и температура быстро уменьшаются. Говоря «быстро», нужно помнить, что время внутри и вблизи такой огромной массы (объединяющей всю массу Вселенной), в соответствии с общей теорией относительности, течет очень медленно по сравнению с нашими масштабами времени. Однако, для того чтобы не терять связи с привычными понятиями, мы будем пользоваться общепринятыми единицами — сантиметрами для измерения расстояний в пространстве и секундами для измерения промежутков времени.

Оценки показывают, что измеренная по современной шкале температура исходного сверхплотного сгустка превышает огромную величину, содержащую по крайней мере 22 нуля после какой-нибудь значащей цифры. В связи с тем, что на ближайших страницах нам придется часто иметь дело с такими огромными числами, условимся применять для них сокращенную запись, а именно: указывать количество нулей соответствующей степени числа 10. В данном случае это 10^{22} К, где К указывает, что температура измерена по шкале Кельвина.

В этом адском котле постоянно рождаются и немедленно аннигилируют все известные и еще неизвестные нам частицы. При этом невозможно обнаружить никаких индивидуальных различий между ними даже на расстояниях столь малых, что перед первой значащей цифрой, выражающей эти расстояния, стоят 33 нуля. (Для сокращения записи мы будем писать 10^{-33} см, где знак «минус» в показателе степени означает, что нули стоят

перед единицей.) На этих малых расстояниях наиболее слабое из известных полей — гравитационное поле — оказывается столь же сильным, как остальные известные поля — электромагнитное, слабое и сильное.

В настоящее время не существует теории, способной описать это начальное состояние с его огромной температурой и плотностью. Однако это не значит, что науке ничего не известно о наиболее раннем этапе развития той Вселенной, в которой мы живем. Можно с уверенностью сказать, что уже тогда соблюдался ряд известных законов. Например, закон сохранения электрического заряда. Электрический заряд первоначального сгустка был равен нулю точно так же, как равен нулю полный электрический заряд современной Вселенной. Поэтому заряженные частицы, как и сейчас, рождались и исчезали (аннигилировали) только парами. Так электрон может родиться только в паре со своей античастицей, положительно заряженным антиэлектроном — позитроном. Этот закон связан со свойствами фотонов, участвующих в рождении и аннигиляции электронно-позитронных пар. Фотоны не имеют ни заряда, ни массы покоя — значит, они могут родиться только в ходе процесса, где участвуют частицы, суммарный заряд которых равен нулю.

Обретение истины

Первичное, предельно симметричное состояние Вселенной характеризовалось, по-видимому, и тем, что количество частиц любого типа точно равнялось количеству соответствующих античастиц. Но это длилось очень недолго в нашем масштабе времени. За время, выражаемое в секундах числом, перед которым стоят 35, а может быть, и 40 нулей (10–35 или 10–40 сек), Вселенная расширилась и остыла настолько, что в ней произошло первое нарушение симметрии. Причина его точно неизвестна. Возможно, это было просто случайное отклонение от первоначального симметричного состояния. Суть же его состоит в том, что при температуре порядка 1018 К во Вселенной оказалось чуть больше частиц, чем античастиц.

Для этой области температур уже существует достаточно надежная теория, позволяющая производить расчеты и делать предсказания, то есть удовлетворяющая всем требованиям к научной теории. Она называется теорией Большого объединения, ибо позволяет рассматривать совместно все известные сейчас силовые поля (кроме гравитационного поля) и рассматривать все частицы как члены единого семейства. Такое объединение становится возможным на расстояниях 10–29 см при температуре 1018 К, при которой происходит первое спонтанное нарушение всеобщей симметрии первичного состояния Вселенной — разделение частиц и античастиц.

Температура 1018 К — это та граница, ниже которой разность между числом частиц и числом античастиц, установившаяся при более высокой температуре, уже никогда более практически не нарушается. Поэтому случайное преобладание частиц на этом температурном рубеже сохранится на всем протяжении дальнейшей эволюции Вселенной. Так современная теория эволюции Вселенной решает полувековую загадку антимира. Загадку о том, почему мы живем в мире частиц, а не античастиц.

После того как Дирак предсказал существование позитрона, а затем в 1932 году Андерсон обнаружил его, были предсказаны и обнаружены другие античастицы, и многие ученые пытались выяснить, почему наш мир состоит из частиц, а античастицы рождаются очень редко и только при некоторых взаимодействиях с участием частиц, обладающих очень большой энергией. Такие частицы приходят к нам из космоса в составе космических лучей или получаются при помощи наиболее мощных ускорителей заряженных частиц. Вместе с тем в потоке космических частиц, несмотря на тщательные поиски, до последнего времени не удавалось обнаружить свободных античастиц. Только недавно единственная такая античастица была обнаружена, однако совершенно не доказано — не возникла ли она в результате взаимодействия первичных космических частиц, происшедшего так далеко, что эта античастица сильно удалилась от своего близнеца — частицы — и поэтому была

зарегистрирована как одиночка.

Уверенность в симметрии мира раньше заставляла некоторых ученых предполагать, что где-то во Вселенной существует антимир, зеркальный нашему. Этот антимир был бы очень кстати, он восстановил бы общий баланс частиц и античастиц во Вселенной. Другие предполагали, что половина видимых галактик состоит из антиматерии, но обнаружить это невозможно, ибо идущие от них антифотоны неотличимы от обычных фотонов (фотон, не обладая ни зарядом, ни массой покоя, совпадает со своей античастицей). Опровергнуть эти гипотезы невозможно. Но они противоречат общему духу науки, которая, начиная с Ньютона, отвергает гипотезы, созданные для объяснения единичного факта. В данном случае фактом является неудача или невозможность обнаружения антимира или хотя бы скоплений антивещества.

Новая теория приходит к выводу о том, что существование нашего мира, состоящего из вещества, не скомпенсированного антивеществом, есть прямое следствие сложившейся эволюции Вселенной. Эта эволюция описывается теорией, и целый ряд ее предсказаний уже подтвержден опытом. Существующее положение вещей должно было сложиться именно так, как сложилось при перевесе частиц над античастицами всего на одну лишнюю частицу в каждом миллиарде пар частиц и античастиц! Это произошло на рубеже температуры 1018 К. Именно тогда — всего на одну миллиардную долю — был нарушен баланс между тяжелыми частицами и античастицами. А далее уже все развивалось по знакомым нам законам. Заметим, что тот же результат был бы достигнут при случайном преобладании в одну античастицу на миллиард пар. Ведь названия «частица» и «античастица» даны совершенно условно. Частицы — это те, которые сейчас устойчиво существуют в окружающем нас мире.

Если бы при температуре 1018 К количество частиц случайно оказалось точно равным количеству античастиц, то при последующей эволюции Вселенной все вещество должно было аннигилировать и без остатка превратиться в фотоны и, может быть, другие частицы, не имеющие массы покоя. Следовательно, само существование Вселенной в том состоянии, которое мы наблюдаем, может считаться подтверждением теории Большого объединения.

При температуре 1018 К произошло и другое существенное изменение. Плотность вещества Вселенной настолько уменьшилась по сравнению с исходной, что при расстояниях порядка 10–29 см уже выявились индивидуальные свойства отдельных частиц. Теперь гравитационное поле окончательно перестает играть роль во взаимодействиях отдельных частиц и проявляет себя только в структуре пространства, расширяющегося вместе с расширением самой Вселенной. Позже, когда образуются галактики и звезды, гравитационное поле будет определять и отклонение симметрии пространства в их окрестности от общей симметрии Вселенной.

Итак, для расстояний порядка 10–29 см существует достаточно надежная теория. На этих расстояниях проявления электромагнитного поля и двух других полей, слабого и сильного, действующих между частицами, оказываются одинаковыми, а гравитационное поле перестало играть роль в микромире, заняв свое место во взаимодействии макроскопических тел.

При этом все частицы оказываются объединенными в общее семейство. И исчезает запрет, препятствующий, например, протону превращаться после ряда промежуточных этапов в несколько фотонов.

В качестве одного из следствий этой теории является предсказание, которое показалось бы безумным ещё 30 лет назад; предсказание того, что такие распады протона возможны и в наши дни.

Мы привыкли считать, что протон — образец вечного постоянства. И вот ныне теория утверждает, что протон живет не вечно, что он может распасться. Теория предсказывает, что в современном мире при современных температурах эти спонтанные превращения протонов в фотоны очень редки. Для единичного протона вероятность такого распада — один раз за 1031 лет! Но известно, что возраст нашей Вселенной составляет всего от $1 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{10}$ лет! Не значит ли это, что протон следует считать истинно устойчивой частицей? Нет, ведь

их очень много. Так много, что и при этой крайне малой вероятности распада во Вселенной действительно должны происходить такие процессы. Поэтому ученые приступили к опытам, цель которых обнаружить столь удивительное и маловероятное событие. Ведь положительный результат был бы сильнейшим аргументом в пользу теории Великого объединения главных сил, действующих в природе, и объединения всех частиц в единое семейство, обладающее чрезвычайно симметричным строением, причем отклонения от этой симметрии объясняют все известные различия между частицами.

Идея этого опыта основана на том, что элементарные частицы очень малы и их очень много. Достаточно взять 1000 тонн любого вещества, чтобы в нем содержалось около $5 \cdot 10^{32}$ протонов и нейтронов. Если этим веществом является вода, то протонов в ней чуть больше половины. Это значит, что, при вероятности распада 10^{-31} в год, в течение года следует ожидать примерно 25 случаев спонтанного распада протонов. Для того чтобы наблюдать эти чрезвычайно редкие события, опыты будут проводиться в глубоких шахтах или в глубине океана, чтобы уменьшить помехи со стороны космических лучей, которые могут исказить результаты опыта.

Мы сосредоточили внимание на рубеже, на котором при температуре 1018 К сложилась основа той Вселенной, которую мы наблюдаем теперь. Именно после этого, вследствие случайного избытка в 1 частицу на 109 античастиц и после аннигиляции этих античастиц с соответствующим количеством в 109 частиц, осталась и ныне существует вся материя Вселенной и множество фотонов. Затем, на протяжении огромного периода времени, который по нашим часам длился примерно 0,01 сек, температура расширяющейся Вселенной упала до 1011 К (100 миллиардов градусов). В течение этого времени, после завершения аннигиляции тяжелых частиц, вещество Вселенной не испытало существенных изменений. Оно состояло главным образом из фотонов, электронов, позитронов и нейтрино с их антинейтрино. Доля тяжелых частиц — протонов и нейтронов, уцелевших в процессе аннигиляции, была малой.

Первые три минуты

Когда температура в результате расширения Вселенной упала до 100 миллиардов градусов, плотность равновесной массы вещества и излучения была в 3,8 миллиарда раз больше, чем плотность воды на поверхности Земли в наше время. При этом окружность Вселенной была невелика, так что свет мог обогнуть ее за несколько лет. Впрочем, этот размер еще точно не известен, а дальнейшая эволюция Вселенной не зависит от ее начальных размеров.

Через 0,11 секунды температура упала до 30 миллиардов градусов, но ничего существенного за это время не произошло. По-прежнему Вселенная наполнена фотонами, электронами, позитронами, нейтрино и антинейтрино. Но плотность этой равновесной мешанины значительно уменьшилась, падая как четвертая степень уменьшения температуры. Изменилось и соотношение между протонами и нейтронами, количество которых в начале предыдущего этапа было одинаково. Изменение произошло потому, что протоны и нейтроны при температуре 30 миллиардов градусов еще не способны объединяться в ядра атомов, а свободные нейтроны, как известно, неустойчивы. Каждый из них в среднем через 15 минут превращается в протон, выделяя также электрон и нейтрино. В результате таких распадов к концу этого этапа развития из каждых ста ядерных частиц лишь 38 были нейтронами, а 62 протонами.

Прошло всего около одной секунды, но за это время, в результате быстрого расширения, температура упала до 10 миллиардов градусов, а плотность вещества уменьшилась настолько, что нейтрино и антинейтрино практически перестали взаимодействовать с остальными частицами и излучением. Дальнейшая судьба реликтовых нейтрино не известна вследствие необычайной трудности исследования этих частиц. Их эволюция протекает практически независимо от эволюции остального вещества, а их главная

роль состоит в том, что на их долю приходится некоторая часть общей массы Вселенной, определяющей темп ее расширения.

К этому моменту общая плотность материи «лишь» в 380 000 раз превышала плотность воды, а распад нейтронов, все еще не объединившихся с протонами в ядра атомов, привел к тому, что осталось только 24 нейтрона на каждые 76 протонов.

Когда прошло всего 13,82 секунды от начала нашей истории и температура понизилась до 3 миллиардов градусов, энергия фотонов уже стала недостаточной для рождения электрон-позитронных пар. Электроны и позитроны продолжали аннигилировать при встречах, но уже не рождались вновь. Симметрия вещества и антивещества окончательно нарушилась. К протонам и нейтронам присоединился избыток электронов, в точности равный числу протонов, ибо общий электрический заряд Вселенной остался равным нулю.

В это же время начался новый этап эволюции. Протоны и нейтроны сливались в ядра гелия до тех пор, пока не исчерпались все свободные нейтроны. Температура была уже недостаточной для того, чтобы разрушать образующиеся ядра. Но процесс образования ядер гелия шел медленно, так как они могли рождаться только путем случайных и достаточно редких встреч двух протонов и двух нейтронов.

Более надежный путь последовательных превращений, например через образование ядра дейтерия (при много более вероятной встрече одного протона и одного нейтрона с последующим превращением в тритий — путем присоединения еще одного нейтрона, или в легкий изотоп гелия — гелий-3 — путем присоединения к ядру дейтерия одного протона), не мог реализоваться, ибо при температуре в 3 миллиарда градусов все эти ядра распадались слишком быстро. Так быстро, что цепочка не успевала завершиться присоединением еще одной частицы, необходимой для появления устойчивого ядра гелия-4. Поэтому распад свободных нейтронов продолжался, и число их упало до 17 на каждые 83 протона...

Прошло 3 минуты и две секунды от начала нашего отсчета времени. К этому моменту температура упала до 1 миллиарда градусов, что всего в 70 раз больше, чем температура в недрах Солнца. После этого во Вселенной остались главным образом лишь фотоны и нейтрино со своими антинейтрино. Энергия, выделившаяся при аннигиляции электронов и позитронов перешла в фотоны, так что температура фотонов стала на 35 % выше температуры нейтрино, продолжавших участвовать в расширении Вселенной, практически без взаимодействия с остальными частицами. В конце этого этапа истории мира малое, по сравнению с числом фотонов и нейтрино, количество не аннигилировавших электронов оказалось равным количеству положительно заряженных ядер. Но температура в 109 К слишком велика для объединения ядер и электронов в атомы. Состояние электрической нейтральности существует до наших дней и будет существовать вечно. Ведь закон сохранения электрического заряда принадлежит к тем фундаментальным законам сохранения, случаев нарушения которых ни разу не зафиксировано.

Последний заслуживающий упоминания момент ранней истории Вселенной отстоит от нашего начала отсчета времени на 34 минуты и 40 секунд. К этому времени температура упала до 300 миллионов градусов, причем температура излучения за счет энергии, освобождавшейся при аннигиляции электронов и позитронов, теперь на 40,1 % превышает энергию нейтрино. Общая средняя плотность Вселенной всего на 9,9 % превышает плотность воды, причем 31 % ее относится к плотности нейтрино и антинейтрино, а 69 % составляет плотность фотонов. Плотность остальных частиц составляет ничтожную часть общей плотности Вселенной. Эти частицы присутствуют в форме свободных протонов и ядер гелия, причем последние составляют от 22 до 28 % от общего количества тяжелых частиц. Количество электронов точно равно количеству протонов (свободных и связанных в ядрах гелия), но ведь масса каждого электрона примерно в 2000 раз меньше массы протона. Однако температура все еще слишком высока, чтобы электроны могли объединиться с протонами и ядрами гелия в атомы водорода и гелия.

Это состояние сохранялось в течение 700 000 лет. Вселенная продолжала расширяться и остывать. При этом не происходило никаких существенных изменений ее состава. Так

продолжалось, пока ее размеры не достигли примерно тысячной части современных размеров, а температура не упала до 3000 К. При этой температуре электроны присоединились к ядрам, образовав нейтральные атомы гелия и водорода. Энергия большинства фотонов при этом была уже недостаточна для того, чтобы оторвать электроны от ядер. Вселенная стала практически прозрачной, электромагнитное излучение, заполнявшее Вселенную, теперь «отключилось» от вещества. Тепловое равновесие между ними нарушилось. Вещество и фотоны продолжали расширяться почти независимо. Именно с этого момента, продолжая остывать, сохранилось реликтовое излучение, обнаруженное Пензиасом и Вилсоном...

Сценарий ранних этапов развития Вселенной составлен лауреатом Нобелевской премии Вайнбергом и опубликован в его замечательной книге «Первые три минуты».

Для того чтобы завершить эту часть нашего рассказа, нужно сказать подробнее о том, почему радиотелескопы зафиксировали реликтовое излучение с температурой 3° , а не 3000° , при которой излучение потеряло тепловой контакт с веществом Вселенной. Причиной является продолжающееся расширение Вселенной. Реликтовое излучение приходит к нам из всей «глубины» Вселенной, включая ее самые отдаленные части. Объем этих удаленных частей много больше, чем объем более близких областей. Ясно, что главная часть реликтового излучения приходит оттуда. Но красное смещение там очень велико, ведь скорости удаления многих галактик составляют половину и более от скорости света. Расчет показывает, что, просуммировав все излучение, приходящее к нам по каждому произвольному направлению, мы получим то, что дало бы абсолютно черное тело с температурой $2,96^\circ$ выше абсолютного нуля.

Новейшие измерения дают несколько меньшее значение эквивалентной температуры реликтового излучения. Это еще одна из нерешенных загадок мироздания. Загадочным является малое (примерно на 20 %) отклонение от расчетной величины. Но в основном эксперимент хорошо согласуется с космологическими выводами теории относительности.

После «отключения» электромагнитного излучения от вещества, когда температура, уменьшаясь, перешла предел, при котором фотоны уже не могли эффективно взаимодействовать с частицами, и пространство стало практически прозрачным для электромагнитных волн, достигли значительных размеров случайные отклонения плотности вещества в пространстве от ее среднего значения. До этого плотность первичной смеси была повсюду практически одинакова, однородно уменьшаясь от первоначальных огромных плотностей. Теперь начали возникать местные сгущения. Это нарушило первоначальную устойчивую и однородную картину. Силы притяжения приводили ко все большей концентрации вещества в областях случайных сгущений. Так началось возникновение галактик, а затем и остальных небесных тел. Теперь в регулярном фридмановском расширении участвовали лишь центры масс местных сгущений. Возникли регулярные движения отдельных частиц относительно этих центров.

Новый эфир

Не следует считать, что процесс расширения, последовавший за Большим взрывом, можно рассматривать как распространение вещества и излучения в пространстве, бывшем до того пустым. Общая теория относительности показывает, что пространство чрезвычайно тесно связано с заполняющей его материей, существующей в нем в форме вещества и излучения. В процессе расширения участвует само пространство вместе с заполняющим его излучением и веществом.

Пытаясь выразить словами это глубокое свойство пространства, Эйнштейн называл его «новым эфиром», ибо местные движения частиц и целых звезд относительно центра соответствующей галактики являются движениями относительно расширяющегося пространства. Ведь неподвижны относительно этого пространства только центры тяжести таких огромных систем, как галактики.

Теория относительности, подчеркивающая значение относительных перемещений различных тел, показывает, почему невозможно обнаружить равномерное и прямолинейное движение какого-либо отдельного тела, не привлекая для такого опыта другие тела. Это связано с тем, что пространство само по себе не имеет никаких «верстовых столбов», никаких отметин, по которым можно судить о движении. Лишь ускоренное движение может быть обнаружено без всякой связи с внешними телами. Знаменитый опыт Майкельсона, стремившегося обнаружить движение Земли относительно эфира, так же как последующие повторения этого опыта, давали отрицательный результат. До создания теории относительности это казалось поразительным. Теперь мы знаем, что ничего иного нельзя ожидать. Эти опыты следует рассматривать лишь как экспериментальное подтверждение постулата Эйнштейна о постоянстве скорости света, о независимости этой скорости от движения наблюдателя и его приборов.

Открытие реликтового излучения радикально изменило ситуацию.

Реликтовое излучение и его эволюция неразрывно связаны с пространством и его расширением. Изучая свойства реликтового излучения, можно не только проверить справедливость теории Большого взрыва, но и обнаружить движение наблюдателя относительно этого излучения, а следовательно, и относительно самого расширяющегося пространства. В 1977 году Маллер и его сотрудники в Калифорнийском университете задумали с этой целью повторить измерения изотропии реликтового излучения, увеличив в тысячу раз точность измерения, достигнутую Пензиасом и Вилсоном. Для этого они избрали волну длиной 9 мм и, чтобы избежать влияния шумов атмосферы, должны были поднять аппаратуру на высоту более 15 км, где практически нет паров воды, излучающих в этом диапазоне. Влияние излучения молекул кислорода исключалось специальной системой, периодически переключавшей элементы схемы приемника. Измерения велись по ночам, чтобы не мешало радиоизлучение Солнца и оно не нагревало антенну. Для исключения сезонных эффектов измерения велись целый год.

Результат был несомненным и сенсационным. Оказалось, что температура излучения, приходящего к приборам из глубины Вселенной по различным направлениям, не оставалась постоянной вопреки измерениям Пензиаса и Вилсона.

Отклонение было столь малым, что не могло быть зафиксировано приборами первооткрывателей. Но новые приборы, примененные Маллером, показали, что излучение, приходящее со стороны созвездия Льва на 3,5 миллиградуса теплее, а приходящее с противоположного направления на 3,5 миллиградуса холоднее среднего значения температуры излучения. При этом зависимость температуры излучения от направления описывалась законом косинуса. Если же вычесть такое косинусоидальное изменение из результатов опыта, то остаток оказывался изотропным (то есть одинаковым во всех направлениях) с точностью до $1/3000$.

Полученные результаты легко объяснить предположением о том, что антенна вместе с Землей перемещается в поле реликтового излучения. Поэтому в направлении движения (в сторону созвездия Льва) мы видим это излучение более «горячим», а в противоположном направлении более «холодным». Иными словами, наблюдается эффект Допплера — «голубое» смещение спектра при наблюдении в сторону движения и «красное» смещение в противоположном направлении. Наблюдается новый эфирный ветер — ветер реликтового излучения...

Расчет показывает, что измеренное смещение соответствует скорости Земли относительно поля реликтового излучения, равной 390 км/сек.

Теперь мы знаем, что Земля участвует в трех движениях: в движении по орбите вокруг Солнца со скоростью 30 км/сек, движении вместе с Солнечной системой вокруг центра Галактики со скоростью около 300 км/сек и в движении Галактики как целого, относительно поля реликтового излучения, то есть относительно расширяющегося пространства общей теории относительности. Произведя исследования величины и направления этих скоростей, Маллер определил, что наша Галактика движется относительно пространства со скоростью

около 600 км/сек. Так неожиданно реализовалось еще одно предвидение Эйнштейна. Его «новый эфир» получил воплощение в реликтовом электромагнитном излучении, дошедшем до нас как эхо Большого взрыва и позволяющем измерить скорость Земли относительно расширяющегося пространства.

Эйнштейн лучше других понимал, что его теория не имеет ничего общего с так называемым философским релятивизмом, отрицающим само существование абсолютного знания. Эйнштейн многократно подчеркивал, что его теория выражает результат объективного познания реального внешнего мира и является инструментом для изучения внешнего мира. При его жизни реликтовое радиоизлучение еще не было открыто. Поэтому не могло быть и речи о возможности обнаружить равномерное движение без наблюдения перемещения относительно каких-либо внешних тел. Ускоренное движение поддавалось такому обнаружению. Физики объясняли «абсолютный» характер ускорения тем, что оно отражает состояние движения рассматриваемого тела относительно совокупности всех масс Вселенной. Теперь наблюдение «нового эфирного ветра» позволяет обнаружить и равномерное движение относительно реликтового излучения, а значит, и относительно расширяющегося пространства Эйнштейна— Фридмана. Факт, не менее замечательный, чем открытие реликтового излучения.

Читатель вправе спросить: чем объясняется то, что реликтовое излучение было обнаружено случайно, что правильные предсказания теории долго оставались незамеченными? Отчасти это связано с узкой специализацией наук. Объем знаний столь велик, что охватить их полностью совершенно невозможно. Трудно хорошо ориентироваться даже в пограничных областях. Горькой шуткой звучит определение узкого специалиста как человека, знающего все ни о чем (то есть все, но в слишком узкой области), и широкого специалиста как человека, знающего обо всем, но ничего (то есть слишком поверхностно).

Возвращаясь к нашей истории, нужно признать, что радиоспециалисты Пензиас и Вилсон в 1965 году ничего не знали о теории Большого взрыва и ее следствиях. В свою очередь, астрофизики и физики-теоретики не знали о том, что современные приборы способны обнаружить реликтовое излучение с температурой всего 3 К. Вайнберг, перерабатывая в 1976 году свою лекцию, прочитанную в 1973 году, и завершая книгу о трех первых минутах, не подозревал, что уже в 1973 году две группы ученых начали независимо готовить аппаратуру для обнаружения нового эфирного ветра и что в 1976 году опыты начались. Таковы пути науки. Человек не способен охватить весь объем знаний, добытых человечеством. Может быть, вычислительные машины будущего смогут помочь делу, сопоставляя и анализируя результаты познавательной деятельности всего человечества. Это приведет к резкому возрастанию темпов прогресса, к новой научно-технической революции. Но это дело будущего.

Здесь уместно напомнить, что общая теория эволюции Вселенной еще далека от завершения. Не ясны первые мгновения. Была ли тогда температура еще выше или она была низкой, а вещество находилось в еще неизвестном нам состоянии... У читателя может возникнуть вопрос о том, что было до того, как все началось, и что будет в будущем. Мы, привыкшие к тому, что мир будет существовать вечно, с трудом воспринимаем мысль о его начале и возможном конце.

Прежде всего о будущем. Эксперимент, именно эксперимент, как это ни кажется странным, не дает еще возможности предсказать будущее Вселенной. Речь идет вовсе не о том, что до этого нужно дожить. Масштабы совсем иные. Просто ученые должны точнее оценить среднюю плотность вещества во Вселенной. Если эта плотность меньше определенной величины, Вселенная будет расширяться вечно. Если плотность больше, сила тяготения остановит расширение и вещество снова начнет сжиматься. Начав сжиматься, Вселенная придет к исходному состоянию, которое вновь приведет к Большому взрыву и к новому циклу расширения. Время, необходимое для этого, зависит от средней плотности вещества.

Существует гипотеза, описывающая процесс, приводящий к началу расширения. Она

исходит из того, что на заключительной стадии сжатия, когда температура достигает 10 К, все сливается воедино — вещество, энергия и само пространство. Это состояние высшей однородности и высшей симметрии еще не может быть рассмотрено на основе существующих теорий. Гипотеза состоит в том, что это состояние является неустойчивым. Тогда малейшее случайное отклонение от высшей симметрии становится причиной начала нового расширения. Началом Большого взрыва. Многие ученые интуитивно склоняются к подобному взгляду на будущее Вселенной и считают, что она развивается периодически. Мы живем в один из таких циклов и наблюдаем его в эпоху, отстоящую примерно на 10–20 миллиардов лет от рождения мира. Но гипотеза — это еще не теория. Ее трудно примирить со вторым началом термодинамики, которое заставляет предполагать, что при циклическом повторении расширения и сжатия интенсивность Больших взрывов будет раз за разом уменьшаться, и пока не ясно, что может предотвратить такое развитие событий. Однако временные масштабы циклов столь велики, что этот вопрос имеет лишь принципиальное значение.

Конечно, человеческий ум стремится решить и такие, далекие от современной жизни, проблемы. Впрочем, возможно, что этот вопрос отпадет сам собой, если изменения приведут к столь малой средней плотности, что расширение Вселенной не сможет затормозиться и будет продолжаться вечно. Но тогда вновь возникнет вопрос о начале и о том, что было «до начала». Современная наука считает такую постановку вопроса ненаучной, ибо, как показала теория относительности, течение времени замедляется вблизи больших масс. Если вся материя соберется в одну точку, то течение времени практически прекратится. Современная наука еще не умеет справиться с бесконечностью, скрывающейся в первых мгновениях развития Вселенной. Но уже теперь существуют теории, показывающие, почему начальный момент оказывается столь же недостижимым, как абсолютный нуль температурной шкалы Кельвина.

Трудно представить себе более увлекательное путешествие в глубь времени и пространства, чем то, которое мы совершили. Поражает сам факт возможности достоверного знания о событиях, отстоящих от нас на 20 миллиардов лет... Вайнберг, ученый, для которого занятия наукой должны были бы выглядеть как будничное дело, не может скрыть волнения, говоря о проделанной работе. «Откровенно говоря, — признается он, — мы не абсолютно уверены во всем этом, но волнует, что сейчас мы способны говорить о подобных вещах хоть с какой-то долей уверенности. Я не в силах избавиться от ощущения нереальности, когда пишу о первых трех минутах так, как будто мы действительно знаем, о чем говорим».

Вывести — чисто умозрительно — ход событий, которые по масштабам превосходят все, что соизмеримо с человеческой жизнью, обобщить всю информацию, наблюдения, размышления, скопленные человечеством более чем за двадцать веков, — помог человеческий Разум, который так же совершенствуется, развивается, эволюционирует, как и вся Природа в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приступая к повествованию, автор поставил перед собой цель показать читателю основные свойства того мира, в котором мы живем. Слово «показать» здесь означает — сделать очевидным, проиллюстрировать простыми, наглядными примерами. Среди основных свойств мира, которые имелись в виду, прежде всего стоит реальность, материальность, единство мира и непреложный факт его познаваемости. Поэтому в качестве проводника избрана физика.

Автор хотел провести читателя по крутой спирали, соединяющей примитивные познания древних с наиболее современными знаниями наших дней, не скрывая того, что временами подъем витков спирали уменьшался, отражая застой в развитии науки.

Единство мира приводит к тому, что одни и те же факты играют роль при построении

различных теорий, порой весьма далеких одна от другой. Это единство зачастую находит отражение в единстве математических уравнений и формул, описывающих весьма различные процессы, например, распространение радиоволн и нервных импульсов, работу генератора радиоволн и человеческого сердца. Наконец, это единство выражается в форме чрезвычайно общих принципов и теорий, а кульминационным пунктом здесь является высшая цель — построение единой теории, объединяющей все. Конечно, для объяснения конкретных свойств мира и конкретных процессов из этой всеобщей теории, по необходимости, выделяются упрощенные или приближенные частные случаи.

Два обстоятельства (во-первых, то, что эта книга ни в коем случае не может играть роль учебника, а поэтому не требует от читателя запоминания всего прочитанного, и, во-вторых, сам факт единства мира) привели к тому, что в тексте иногда встречаются напоминания об изложенном в предыдущих главах. Напоминания, дополняющие уже известное новыми деталями или подчеркивающие нужное для дальнейшего.

Автор считает крайне важным помочь читателю прочувствовать не только единство природы, но и единство науки. Ибо наука есть отражение природы в голове человека, а если природа едина, то должна быть единой и наука. Конечно, наука распадается на различные конкретные дисциплины: единую природу можно и нужно рассматривать со многих сторон, с различных точек зрения. Но все эти конкретные науки неразрывно связаны единством объекта исследования, единством природы.

В этой книге речь шла о мысленных экспериментах, математических моделях и физических теориях. Мы познакомились с взаимоотношениями, сложившимися в простой и короткой цепочке: опыт — теория — опыт.

Здесь не написано ни одной математической формулы. Но это лишь видимость. По существу, речь шла именно о математических формулах, так как и математические модели, и физические теории могут быть описаны полностью только при помощи математических уравнений. Только их решение дает возможность испытывать сложные машины, например самолеты, до того, как они изготовлены, позволяет доказать непротиворечивость теории и извлекать из теории предсказания, подлежащие проверке новыми опытами.

Во многих случаях физические теории приводят к очень простым математическим моделям, выражаемым чрезвычайно короткими и простыми на вид математическими формулами. Такая ситуация возникает, например, при изучении течения жидкостей или циркуляции атмосферы.

Не зная способов точного решения, математика прибегает к приближенным решениям при помощи ЭВМ. Но это от слабости. Машинное решение хорошо для проверки гипотезы, для анализа частных случаев, для расчета конструкций, идеи которых возникли на основе интуиции. На большее не способны даже самые совершенные современные ЭВМ. Они не обладают интуицией, присущей людям. Поэтому математики разрабатывают и другие методы качественного анализа уравнений. Эти методы позволяют выявить физическое содержание явления, заложенного в уравнение, и делать предсказания без решения уравнений. Это увлекательный путь. Он пролегает по целине, где намечены лишь отдельные, идущие еще не очень далеко и почти не соприкасающиеся тропы. Многие видят в этом направлении математику будущего, а с ней новый расцвет и быстрый прогресс наук о природе и новую техническую революцию.

Одна из наиболее разведанных троп имеет в основе изучение свойств кривых линий или поверхностей, непосредственно связанных с самими уравнениями. Причем анализ свойств кривых и поверхностей позволяет судить о свойствах решений, несмотря на то, что они не получены.

Не следует думать, что здесь скрыта какая-то невообразимая мистика. Просто таковы новые, еще не покрытые асфальтом и не доведенные до конца пути развития науки. Они уже дают первые результаты.

Кое-что описанное в этой книге получено учеными, смело пошедшими этими новыми путями.

Эти замечания имеют две цели. Первая — подчеркнуть значение математики в современной науке и технике, которая незримо играла свою роль за сценой в описании всех проблем, затронутых в этой книге. Вторая — привлечь интерес читателя к математике, к этой древнейшей науке, находящейся сейчас на пороге нового развития, привлекающей смелых и любознательных своей почти не тронутой целиной.

Еще одна мысль, которую хотелось бы подчеркнуть: читателю важно почувствовать универсальность метода познания, который на протяжении веков выработался в области естественных наук. Этот метод нам знаком: от принципов к математической модели, к предсказанию новых явлений и их экспериментальному исследованию. Выработанный в процессе познания природы, этот метод стал актуальным в наше время также в технике и других отраслях народного хозяйства. В наш век, в эпоху научно-технической революции, он выходит далеко за пределы фундаментальных исследований.

При проведении технической разработки, проектировании завода или скотоводческой фермы этот метод лишь немного изменил свое конкретное содержание. В этом случае «принципами» служат данные науки, на их основе составляется математическая модель, ее исследование (обычно при помощи ЭВМ) служит основой проекта, реализация, освоение и использование которого выполняют в данном случае роль, которую в науке отводят эксперименту. И здесь опыт является высшим судьей, проверяющим правильность «принципов» — научных основ разработки.

Не следует забывать, что книга, которую вы прочли, не ставит своей целью научить физике — это под силу лишь систематическому курсу, излагающему предмет от «а» до «я». Не ставит она целью и дать исчерпывающую информацию о современном положении дел в науке о природе. Нет, цель гораздо скромнее. Она заключается в желании автора показать человеку школьного возраста, знающему предмет в объеме старших классов, соотношение между теорией, опытом и наблюдением на примере тем, затронутых в книге. Показать, что в истории человеческой мысли практически нет ненужных усилий, не пригодившихся теорий, не оправдавших себя гипотез. Мыслительная работа не исчезает бесследно, она может лишь перейти в другую форму — в энергию знания.

Даже гипотезы, противником которых был Ньютон, играли определенную роль в истории, если их создавали не невежды, а образованные люди, обладающие солидным багажом знаний. Эти гипотезы отражали определенный подход к явлениям. Каждая гипотеза, или теория, или наблюдение, или мысленные эксперименты, даже если они оказывались ошибочными, дали свои плоды. Либо отмели сомнение, либо дали право вывесить у одного из перекрестков науки указатель «тупик», «хода нет». Либо послужили трамплином для нового взлета мысли.

Цель книги и в том, чтобы проиллюстрировать, что достижения мысли взаимосвязаны. Пусть какое-то открытие оценено не сразу, не тотчас нашло себе место в мозаике единой картины мира, но настанет момент, и другой художник, рисующий более точную панораму Вселенной, может почувствовать острую нужду именно в этом, долго бывшем в бездействии, открытии...

Многие прозрения рождаются раньше, чем в них появилась потребность. Пример: Эйнштейн отказался от важной мысли, многообещающей теории потому, что в ней проявился элемент природы — положительный электрон, который в те времена не был известен. Дирак — уже после Эйнштейна — натолкнулся в своих уравнениях на ту же частицу, тоже недоумевал, терзался, мучился, был не в силах совладать с этим сюрпризом. Но наука за прошедшее время проделала большой путь, и навстречу теоретикам вышли экспериментаторы. Проходка «туннеля» с обоих концов привела к тому, что поиски встретились. Люди узнали об античастицах, антиматерии и о том, почему нет антимира...

Задача книги и в том, чтобы показать преемственность поколений, научных школ. Линия эфира идет от Аристотеля, теряется в болоте невежества средневековья, вновь возникает у Гюйгенса, Френеля, Лоренца. Эфир утрачивает право голоса в бессилии перед аргументацией теории относительности. И вдруг, словно птица Феникс, возрождается в

наши дни интуитивными соображениями Эйнштейна, а затем трудами далеких от проблем теоретической физики радиоинженеров Пензиаса и Вилсона, которые никогда не думали о загадке рождения Вселенной, но объективной логикой развития науки были подведены к этой созревшей теме. Не подозревая последствий, они приступили к исследованию радиосуммов космоса, а обнаружили... то, в чем другие ученые опознали новый эфир.

Смысл книги и в том, чтобы продемонстрировать, как в науке идет постоянная переоценка ценностей. Постоянное сравнение точек зрения, переплетение разных достижений, взглядов. Безжалостный отсев ложных шагов... Напряженный поиск объективных методов познания...

Эта книга — не жизнеописание людей, скорее, описание идей, но судьба идей — отражение судеб людей. Творцы открытий — люди. Виновники ошибок — люди. На арене науки сражаются, соревнуются, отстаивают свою правоту идеи, теории, гипотезы, созданные людьми. Все, что мы узнали из этой книги, — плоды раздумий отдельных людей, но это достояние всего человечества.

Горько вспоминать о несправедливостях, выпавших на долю многих гениев — Галилея, Ньютона, Эйнштейна... Эйнштейн был гражданином Германии, он сделал все, что может сделать человек, чтобы стать гордостью своей страны. Но была такая страница в ее истории, когда нацисты предали культуру своей отчизны, когда они уничтожали то, чем могла и должна была гордиться нация. Они объявили Эйнштейна преступником, и его книги пылали в кострах новой инквизиции вместе с трудами Маркса и Ленина, книгами Манна, Гейне и других прогрессивных ученых и писателей.

Об Эйнштейне написано много. Его биография хорошо известна — из книги в книгу передается легенда его жизни. Он был не очень-то счастлив. Ему мало досталось из того, что более всего нужно человеку, — понимания. Понимания не было в сверстниках — в детстве Эйнштейн был не легким товарищем, необычным подростком, самоуглубленным, задумчивым, он мало играл в детские игры, много думал. Чтобы в шестнадцать лет разгадать поразительную тайну — невозможность увидеть световую волну остановившейся, — ему пришлось много передумать. И это были недетские думы. Не удивительно, что в четыре года он уже задумывался о тайне поведения магнитной стрелки, в двенадцать зачитывался Евклидом, позже его настольными книгами были научно-популярные произведения.

И в зрелости он не стал баловнем судьбы. Терпел фиаско за фиаско в обычных жизненных делах. И даже в годы величайшего триумфа долетало эхо слов, сказанных когда-то преподавателем немецкого языка: из вас, Эйнштейн, ничего путного не получится... И на вершине человеческих возможностей ему дарили больше любопытства, чем понимания. Как же одинок был этот человек, если на закате жизни, вспоминая в «Автобиографических записках» о том, как увлек его огромный мир, существующий независимо от нас, людей, стоящий перед нами как огромная вечная загадка, «доступная, однако... нашему восприятию и нашему разуму», он сделал горькое признание: «изучение этого мира манило как освобождение»...

Поэтому одна из целей этой книги — возможно, главная — призвать юных читателей быть внимательными друг к другу, доброжелательными. Надо помнить, что талант в человеческом обществе — непреходящая ценность, по сравнению с которой меркнет все золото мира. Талант — это общее достояние, это фундамент, залог процветания человечества.

Каждый человек наделен талантом — в той или иной степени, в той или иной области. Частица таланта заключена в каждом из нас...

Автор задумал эту книгу для того, чтобы молодой читатель насладился плодами, которые собрали для него наши предшественники и наши современники. И, восхитившись, понял, что ему, вступающему сегодня в самостоятельную жизнь, предстоят еще более значительные дела. Ведь каждое поколение знает больше, чем предыдущее. Сегодня мы знаем и умеем больше, чем те, кто жил вчера. Мы с еще большим основанием, чем Ньютон, можем сказать, что стоим на плечах гигантов.

История человеческой мысли убеждает нас в том, что обязательно — среди нас или ближайших наших потомков — непременно появится интеллект или интеллекты еще более могучие, чем те, которыми обладали наши великие предтечи. Молодые люди должны быть очень внимательными друг к другу. Они должны жить в ожидании Таланта. В уважении к Таланту.

Мы живем в отсвете великих свершений, в предчувствии грядущих, еще более великих достижений человечества. И мы должны быть их активными участниками.