

Lecture Notes and Supplements in Physics

*JOHN DAVID JACKSON AND DAVID PINES, editors*

---

# The Special Theory of Relativity

*David Bohm*  
Birkbeck College

---

1965

W. A. Benjamin, Inc.  
New York — Amsterdam

*Дэвид Бом*

---

СПЕЦИАЛЬНАЯ  
ТЕОРИЯ  
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

---

*Перевод с английского*

Н. В. Мицкевича

*Под редакцией*

А. З. Петрова

Издательство „Мир“

Москва · 1967

Специальной теории относительности посвящено много книг — монографий, учебников, научно-популярных изданий. Цель данной книги — осветить современный подход к этому ставшему уже классическим разделу физики и в достаточно наглядной и простой форме рассказать о формировании физических представлений о пространстве и времени.

В изложении Д. Бома специальная теория относительности не только исторически и логически обоснована — это естественный и необходимый этап развития науки. Автор детально анализирует основы теории, развитие концепций классической и создание релятивистской механики, процесс возникновения и эволюции физических теорий.

Книга написана интересно и увлекательно, по уровню изложения она доступна широкому кругу читателей с минимальной физико-математической подготовкой. Ее с удовольствием будут читать и научные работники различных специальностей, и преподаватели, и инженеры, и студенты.

*Редакция литературы по физике*

## *Предисловие редактора перевода*

---

Цель, которую поставил Д. Бом в своей книге «Специальная теория относительности», — это отразить современный подход к ставшему уже классическим разделу физики — специальной теории относительности, и на этой основе продемонстрировать формирование физических представлений о таких фундаментальных понятиях, как пространство и время.

Такая цель делает книгу своеобразной и свежей по форме и изложению и, несомненно, полезной и интересной для широкого круга читателей: научных работников, инженеров, студентов и т. д. Отсюда же проистекают ее особенности. Стремление автора сделать интуитивно приемлемой, а не только формально логически обоснованной специальную теорию относительности потребовало тщательного многостороннего анализа основ этой теории и развития понятий о пространстве и времени (экскурсы в связи с этим в психологию человека) и т. п. Эта книга полезна и как попытка анализа процесса развития физических идей, который на современном этапе науки играет важную роль, и для сопоставления с книгами аналогичного плана, среди которых имеется ряд интересных работ, но имеются и неоригинальные компиляции чужих мыслей.

Излагая сначала ньютоновские представления о пространстве и времени, анализируя далее попытки Лоренца сохранить в физике концепции классической механики и переходя наконец к идеям Эйнштейна, автор прослеживает весь трудный процесс создания релятивистской механики и стремится сделать основы этой

механики не только логически, но и психологически необходимыми и естественными для читателя, стремится снять с них покров таинственного и необычайного, столь дорогой сердцу дешевых популяризаторов, и подвести читателя к той грани, за которой кончаются туманные недомолвки и вступает в свои права логика фактов.

В этом автор добивается существенных успехов, но когда он, делая следующий шаг, пытается перейти к философскому осмысливанию законов развития физики и выяснению причин, формирующих восприятие идей пространства и времени, то и по методу, и по выводам он, с точки зрения советского читателя (физика, философа и т. д.), открывает то, что хорошо известно. Например, автор, как нечто оригинальное, обосновывает тот факт, что в науке «нет абсолютных истин», что старые теории заменяются по мере накопления знаний новыми, их обобщающими и т. п.

Далее следует обратить внимание на его попытку объяснить пьютоновское представление об абсолютном пространстве и времени как результат особенностей развития детской психологии (см. приложение в конце книги). Нельзя отрицать того, что некоторые соображения, приводимые автором по этому вопросу, существенны, однако с его решением вопроса трудно согласиться.

Такие понятия, как пространство и время, имеющие мировоззренческий характер, определяющие состояние физики и механики, связаны в своем развитии (а они, несомненно, развиваются) с многими причинами, и попытка объяснить их, взяв только одну из причин (и, по-видимому, не основную — а именно детскую психологию), по меньшей мере спорна. Несомненно, что образование таких понятий зависит и от других причин. В силу своего фундаментального значения эти понятия связаны с социальным строем, с уровнем науки и экономики и т. д. Нужно отметить также, что, взяв на вооружение недостаточный метод, автор, может быть против своего желания, приходит фактически к заключению, что важно не познание природы, а познание взаимосвязей в ней, отводя при этом опыту скромное место фактора, создающего начальные импульсы, подсказывающего мысли.

Точно так же утверждение автора «все познание — это структура из абстракций, окончательная проверка которых состоит, однако, в процессе взаимодействия с миром, что и осуществляется при непосредственном восприятии» (приложение, § 4, стр. 270), является неточным по существу, не согласуется со всем развитием физики и представляет пример того, к чему приводит недостаточный метод исследования.

Число таких примеров можно было бы увеличить, их легко подметит советский читатель, однако не к ним сводится существо книги, наибольшая ценность которой заключается в отмеченной выше большой работе по наглядному осмысливанию основных идей специальной теории относительности. Благодаря этим качествам книга, как нам кажется, должна заинтересовать широкую аудиторию читателей — она будет нужна и полезна им. Необходимо также отметить, что изложение самой теории относительности доведено автором до читателя очень выпукло, впечатляюще. Этому во многом способствует стиль книги, хороший язык и умело скомпонованный иллюстративный материал.

*Профессор А. З. Петров*



## *Из предисловия автора*

---

Главная цель этой книги — изложить теорию относительности как единое целое, разъяснить причины ее принятия, объяснить ее сущность по возможности без привлечения математического аппарата и выяснить ограниченную справедливость некоторых из кажущихся самоочевидными утверждений «здорового смысла», которые затрудняют для нас полное принятие выводов теории относительности. Мы постараемся показать, что представления этой теории так связаны друг с другом, что образуют единое целое, коренным образом отличное от системы понятий прежней ньютоновской теории, и разъясним мотивы перехода от этой последней к столь отличной от нее теории относительности. Таким образом, мы надеемся, что это в какой-то мере дополнит представления, излагаемые во многих специальных курсах, в частности тех, которые входят в стандартную учебную программу вуза и дают студентам лишь отрывочные представления о логической и концептуальной структуре физики в целом.

Мы начнем эту книгу с краткого обзора дорелятивистской физики и некоторых главных экспериментальных фактов, которые вынудили физиков подвергнуть ревизии прежние представления о пространстве и времени, царившие по крайней мере со времен Ньютона. Значительное внимание уделим некоторым попыткам оставить в силе ньютоновские представления, особенно предпринимавшимся Лоренцем в рамках теории эфира. Преимущество такой последовательности изложения не только в том, что она помогает читателю лучше понять историю этого критического этапа развития физики, но и в том, что она чрезвычайно ясно показывает природу тех



трудностей, к которым приводили прежние представления. Лишь на фоне этих трудностей удастся вполне понять тот факт, что главная заслуга Эйнштейна состояла не столько в открытии новых формул, сколько в радикальном изменении наших основных представлений о пространстве, времени, материи и движении.

Подать эти новые представления без их истинной связи с прежними представлениями значило бы создать ложное впечатление, будто теория относительности — просто кульминационная точка старой линии развития физики, и не выявить того факта, что теория относительности является новым направлением развития физики, несовместимым с ньютоновскими концепциями уже на том этапе, когда она распространяет физические законы на новые неожиданные области. Поэтому хотя изучение представлений, лежащих в основе теории эфира, отнимет ценное время, которое можно было бы использовать лучше, автор считает, что полезно включить краткий обзор и этих понятий.

Эйнштейн сделал принципиально новый шаг, приняв *относительный* подход к физике. Вместо того чтобы предположить, что предметом физики является изучение абсолютного *вещества*, лежащего в основе мира (например, эфира), он принял, что физика — это лишь изучение *взаимосвязей* между различными сторонами этого мира, тех взаимосвязей, которые принципиально наблюдаемы. В связи с этим важно понять, что прежние ньютоновские представления были смесью этих двух подходов: хотя пространство и время рассматривались как абсолютные, они тем не менее обнаруживали множество «релятивистских» свойств. В этой книге обращается большое внимание как на анализ старых представлений о пространстве и времени, так и на анализ тех представлений «здравого смысла», на которых они основывались, поэтому становится очевидным смешение относительного и абсолютного подходов в ньютоновской физике.

Итак, сначала обсудим некоторые из обычно «скрытых» предположений, лежащих в основе «здравого смысла» и ньютоновских представлений о пространстве и времени, — представлений, которые должны быть от-

брошены, если мы стремимся понять теорию относительности. Затем перейдем к эйнштейновскому анализу понятия одновременности, когда время рассматривается как род «координаты», выражающей взаимосвязь события и конкретного физического процесса, в котором эта координата измеряется. Согласно опыту, величина реально измеряемой скорости света для всех наблюдателей постоянна; отсюда следует, что наблюдатели, движущиеся с различными скоростями, не могут находиться в согласии относительно того, какую величину временной координаты следует приписать удаленным событиям. Это означает, что между ними не будет согласия в определении длин предметов и скорости хода часов. Так, без привлечения каких-либо расчетов можно качественно получить основные следствия теории относительности. Затем покажем, что преобразования Лоренца позволяют выразить в точной количественной форме те выводы, которые прежде были получены без помощи математики. Можно надеяться, что читатель таким образом сначала поймет в общих чертах значение эйнштейновских представлений о пространстве и времени, равно как и теоретические трудности и опытные факты, которые приведут его к принятию этих представлений, а уж затем он сможет разобраться в тонкостях вопроса, вооружившись математикой.

Далее объясняются некоторые принципиальные следствия из преобразований Лоренца, причем не только с точки зрения смысла этих преобразований, но и естественного подхода к формулировке *принципа относительности*: основные физические законы — это инвариантные *соотношения*, одинаковые для всех наблюдателей. Принцип относительности будет проиллюстрирован на ряде примеров. Мы покажем затем, что этот принцип приводит к формулам теории относительности Эйнштейна, выражающим зависимость массы и импульса тела от его скорости. Анализируя эти формулы, придем к знаменитому эйнштейновскому закону

$$E = mc^2,$$

устанавливающему связь между энергией тела и его массой. Мы во всех подробностях разберем смысл этого

закона, обратив особое внимание на проблему «энергии покоя» и ее истолкование на основе колебательного движения частиц тела, стремящихся занять низшие энергетические уровни. Автор по своему опыту знает, что эта связь между массой и энергией вызывает большую путаницу в умах читателей главным образом потому, что эта связь противоречит известным «интуитивным» предположениям о строении нашего мира, покоящимся на представлениях «здорового смысла» и их развитии в механике Ньютона. Поэтому полезно разобраться в неявно принимаемых представлениях «здорового смысла», касающихся массы, и убедиться в их необязательности. Проанализировав различия между ньютоновским и эйнштейновским пониманиями массы, мы увидим, что в эквивалентности массы и энергии нет ничего парадоксального.

На протяжении всей книги мы будем постоянно обращать внимание на вошедшую в привычку тенденцию рассматривать старые методы мышления как неизбежные — тенденцию, которая всегда сильно тормозила развитие новых научных идей. Корни этой тенденции лежат в молчаливом предположении, будто физические законы — это абсолютные истины. В этой книге мы анализируем довольно подробно само понятие абсолютной истины и покажем, что оно расходится с фактами исторического развития науки. Покажем, что научную истину лучше рассматривать как систему взаимосвязей, справедливых в ограниченной области, пределы которой можно определить лишь в ходе дальнейшего развития эксперимента и теории. Хотя у любой данной науки могут быть длительные периоды развития и формулировки системы основных понятий, время от времени она должна вступать в критическую фазу, когда старые понятия, ранее казавшиеся ясными, становятся неясными и сомнительными. При разрешении таких кризисов происходит радикальная смена основных понятий, причем новые идеи противостоят старым, сохраняя вместе с тем их верные стороны в частных случаях, предельных случаях и в приближениях. Таким образом, научные исследования — это не процесс постоянного накопления абсолютных истин, достигший своего апогея в современных тео-

риях, а процесс гораздо более динамический, при котором не может быть окончательных теоретических представлений, пределы применимости которых не имели бы границ. Признание этого факта должно сослужить пользу не только в физике, но и в других науках, сталкивающихся с подобными проблемами.

Мы закончим книгу обсуждением диаграмм Минковского, сделав это весьма подробно для того, чтобы графически проиллюстрировать содержание принципа относительности. В этой иллюстративной части введем «метод коэффициента  $k$ », который помогает понять эйнштейновские представления о пространстве и времени, а также провести сравнение между следствиями этих представлений и представлений Ньютона. Мы подчеркнем здесь роль понятий *события* и *процесса* как основы релятивистской физики в противовес понятиям *предмета* и его *движения*, на которых основывалась теория Ньютона. Это приведет нас к гиперболической геометрии пространства-времени Минковского, в которой события, лежащие внутри световых конусов прошлого и будущего, инвариантно отличаются от событий, лежащих вне этих конусов. Благодаря такому отличию становится ясно, что различные наблюдатели не могут прийти к согласию в вопросе об одновременности в релятивистской физике, но это никоим образом не нарушает порядка причины и следствия при условии, что посылать сигналы, распространяющиеся быстрее света, невозможно.

Мы включили в книгу подробное обсуждение истории двух неодинаково быстро старящихся близнецов, один из которых остается на Земле, тогда как другой отправляется в путешествие на космическом корабле со скоростью, близкой к скорости света. Цель этого обсуждения — проиллюстрировать смысл «собственного времени», причем детально выясняется, как именно эйнштейновские понятия пространства и времени допускают для двух раздельно движущихся наблюдателей возможность прожить разные промежутки «собственного времени» между их двумя последовательными встречами.

Наконец мы обсуждаем вопрос о взаимосвязи между реальным миром и нашими различными альтернативными концептуальными представлениями его, такими, как

ньютоновская и эйнштейновская физика. Цель этого обсуждения — устранить путаницу, возникающую при отождествлении концептуального представления действительности с самой действительностью. Такое смещение приводит к трудностям, с которыми сталкивается читатель, впервые разбирающийся в теории относительности. К тому же это понятие о взаимосвязи, основанной на таком представлении, играет фундаментальную роль в математике, так что понимание, скажем, диаграмм Минковского как некоторого отражения реальности поможет читателям прийти к более широкому пониманию связи между физикой и многими разделами математики.

Мы снабдили основной текст приложением, в котором связали эйнштейновские представления о пространстве, времени и материи с некоторыми свойствами обычного восприятия. Обыкновенно полагают, что ньютоновские представления находятся в полном согласии с восприятием повседневного опыта. Однако новейшие экспериментальные и теоретические успехи в изучении естественного процесса восприятия обнаруживают, что многие из представлений «здравого смысла» оказываются неадекватными и путанными, когда они соотносятся с нашими восприятиями, так же как это имеет место в релятивистской физике. Правда, существует заметная аналогия между релятивистским пониманием мира как структуры, сложенной из событий и процессов, законы которых — инвариантные взаимосвязи, и нашим действительным восприятием мира через абстрагирование инвариантных взаимосвязей между событиями и процессами при нашем непосредственном контакте с этим миром. Мы подробно развиваем эту аналогию в приложении, где приходим к мысли о том, что наука — это в основном скорее способ расширения нашего контакта с миром в ходе восприятия, чем собрание знаний о мире. С этих позиций легко понять, почему научное исследование не приводит к познанию абсолютной истины, а приводит лишь (как и при обычном восприятии) к осознанию и пониманию все возрастающего участка мира, с которым мы вступаем в контакт.

Лондон, Англия,  
январь 1964 г.

Дэвид Бом

---

## *Введение*

Теория относительности в собственном смысле этого слова имеет большое значение не только как этап эволюции науки. Еще больше ее роль как первого этапа в радикальном изменении наших основных представлений, начавшемся в физике и захватившем другие области науки, а также как фактора, влияющего на мышление за пределами науки. Дело здесь в общезвестной современной тенденции отхода от понятия «абсолютной» истины (т. е. такого понятия, которое справедливо независимо от условий, обстоятельств, порядка и типа приближения и т. д.) и подхода к представлению, что данное понятие справедливо лишь относительно некоторой системы отсчета в широком смысле этого слова, в рамках которой оно имеет вполне определенное значение.

Именно ввиду чрезвычайной широты своего содержания теория относительности может привести к недоразумению, когда истинность отождествляется не более чем с удобством и пользой. Можно было бы считать поэтому, что раз «все относительно», то дело каждого решать, что говорить или думать по любой проблеме. Применительно к физике такая тенденция часто вносит нечто близкое к скептическому и даже циничному подходу к новым достижениям. Ведь сначала читателю внушают уважение к старым законам Ньютона, Галилея и др. как к «вечным истинам», а потом внезапно в теории относительности (и в еще большей степени в квантовой теории) ему объявляют, что все это давно устарело, и предлагают новую систему «вечных истин» вместо старой. После этого не удивительно, если читатель решит, будто

физики играют в какую-то свою игру с единственной целью получить удобный (подходящий) набор формул, которые предсказывают результаты серии опытов. Это впечатление усугубляется увеличившейся важностью математических методов в новой физике, когда старое концептуальное истолкование физических законов уже в значительной мере отброшено, а взамен ему предложено так мало.

В этой книге будет сделана попытка сформулировать более доступный пониманию подход к теории относительности. С этой целью мы остановимся на истоках тех трудностей, которые привели к появлению теории относительности, и не столько в их хронологическом порядке, сколько подчиняя их систематизацию выводам, заставившим ученых столь радикально изменить свои представления о мире. По возможности будем обсуждать смысл релятивистских понятий, не привлекая математики, подобно тому как это делалось при элементарном изложении прежних, ньютоновских представлений. Мы не откажемся, однако, и от неизбежного минимума математики, без которой наше изложение оказалось бы слишком туманным и затрудняло бы правильное понимание. (За более подробным математическим изложением теории мы отсылаем читателей к какому-либо из многих учебников по этому предмету, которыми так богата современная литература.)

Чтобы сделать более ясным общий ход изменения научных понятий, обсудим беспристрастно и подробно некоторые основные философские вопросы, которые, так сказать, влетают в само содержание теории относительности. Часть этих вопросов возникает в ходе критики старой теории эфира Лоренца, а часть при открытии Эйнштейном факта эквивалентности массы и энергии. К тому же, сменив после нескольких столетий безраздельного владычества ньютоновскую механику, теория относительности подняла важные проблемы, о которых мы уже говорили, например вопрос о том, какой истинностью могут обладать научные теории, если они время от времени подвергаются коренному пересмотру. Этот вопрос мы обсудим подробно в нескольких главах нашей книги.

В приложении будет дан обзор роли восприятия в развитии нашего научного мышления, и мы надеемся, что он бросит новый свет на сущность относительного (или релятивистского) взгляда на вещи. В связи с этим обсудим ход развития наших представлений о пространстве и времени как абстракций, основанных на повседневном восприятии. Это обсуждение с очевидностью покажет, что наши представления о пространстве и времени некоторым образом конструируются на основании повседневного опыта. А отсюда вытекает, что эти понятия применимы, вероятно, только в ограниченных областях, не слишком далеких от тех, в которых они возникают. Вступая в новые области нашего опыта, мы не должны удивляться, что появляется потребность в новых представлениях. Но что действительно интересно, так это обнаружение при научном анализе процесса нормального восприятия, что наш обычный подход к каждодневному восприятию (с некоторыми тонкостями перенесенный в механику Ньютона) является довольно поверхностным, а во многих случаях полностью ложным. При этом внимательный разбор процесса восприятия показывает, что понятия, необходимые для анализа реальных фактов восприятия, ближе к понятиям теории относительности, чем к понятиям ньютоновской механики. Благодаря этому подходу можно придать теории относительности определенную интуитивную ясность, непосредственно доступную для ума и, по-видимому, не требующую сугубо математического выражения. Так как продуктивное физическое мышление обычно требует сочетания как интуиции, так и математики, то можно надеяться, что наш путь позволит глубже и плодотворнее понять теорию относительности (а, возможно, и квантовую теорию).



---

*Доктрины Аристотеля  
относительности*

Обычно ясно не представляют себе того факта, что общее стремление к относительному (или релятивистскому) подходу к физическим законам начало проявляться на весьма раннем этапе развития современной науки. Эта тенденция возникла в противовес еще более древней аристотелевской традиции, которая преобладала в европейском мышлении в средние века и даже в наши дни продолжает оказывать сильное, хотя и косвенное, влияние. Вероятно, за существование этой традиции ответствен не столько сам Аристотель, сколько средневековые схоласты. Они и возвели в абсолют и довели до полной косности те представления, которые сам Аристотель, по-видимому, рассматривал лишь как первую попытку при решении физических, космологических и философских проблем, занимавших древнегреческих мыслителей.

Доктрины Аристотеля отличались чрезвычайной широтой, однако здесь нас интересует лишь его космологическое понимание Земли как центра Вселенной. Аристотель предположил, что Вселенная состоит из семи сфер с Землей в их центре. В его теории ключевую роль играет *расположение* объекта во Вселенной. Таким образом, каждому телу должно соответствовать его естественное место, занять которое оно стремится и к которому приближается, если не встречает препятствий. При этом движение объясняется как следствие этих «конечных причин», но непосредственно вызывается оно «действующими причинами». Например, считается, что предметы падают благодаря их стремлению достичь своего

«естественного положения» в центре Земли, однако необходима еще некоторая внешняя «действующая» причина, которая высвободила бы объект, чтобы его внутренний движущий «принцип» вступил в игру.

Учение Аристотеля во многих случаях правдоподобно объясняло ту область явлений, которая была знакома древним грекам, хотя, как мы, конечно, знаем, оно теряет силу в более широких областях, охватываемых современными научными исследованиями. В частности, оказалось несостоятельным представление об абсолютной иерархии всего сущего, когда каждый предмет стремится занять положенное ему место в этой иерархии. Например, как мы упоминали, все пространство считалось подчиненным раз и навсегда установленной иерархии в форме «семи хрустальных сфер». Позднее средневековые схоласты придали подобную же структуру и времени в том смысле, что сотворение мира было приурочено к определенному моменту, и далее считали, что сам мир движется к некоторой «цели» — к своему концу. Развитие таких представлений приводило к мысли о том, что в выражениях физических законов определенные положения в пространстве и моменты времени играют специальную привилегированную роль и свойства других положений и других моментов должны однозначно соотноситься со свойствами этих первых (привилегированных), если мы правильно поняли законы природы. Подобные же взгляды проникли во все сферы человеческой деятельности и привели к введению неизменных категорий, свойств и пр., подчиненных соответствующим иерархиям. В этой системе мироздания человеку отводилась центральная роль, ибо в некотором смысле он рассматривался как средоточие всей драмы бытия, для него был создан весь мир, и от его морального решения зависела судьба этого мира.

Составной частью доктрины Аристотеля было утверждение, что небесные светила (в частности, планеты), состоящие из материи более совершенной, чем земная, должны двигаться по орбитам, отражающим их внутреннее превосходство. Так как самой совершенной геометрической фигурой считалась окружность, то планетам приписывалось движение вокруг Земли по круговым

путям. Когда же наблюдения не обнаружили идеально круговых орбит, то для устранения расхождения ввели «эпициклы», т. е. окружности с центрами на других окружностях. Так появилась теория Птолемея, без труда «приспосабливающаяся» к любой орбите путем введения сложной системы эпициклов. Так удалось сохранить концепции Аристотеля и «спасти» вместе с тем действительную форму орбит.

Первую серьезную брешь в этой системе пробил Коперник, показавший, что можно избежать сложной и произвольной системы эпициклов, просто приняв, что планеты движутся вокруг Солнца, а не вокруг Земли. Это и было в действительности началом решительной перестройки всего человеческого мышления: ведь отсюда явствовало, что Земля не обязательно должна быть центром мироздания. Хотя Коперник и поместил в этот центр Солнце, он все же сделал большой шаг к тому, чтобы позднее люди поняли, что даже Солнце может быть лишь одной из множества звезд и что вообще нельзя обнаружить какого-либо центра. Тогда, естественно, возникла подобная же мысль и о времени, и Вселенная стала рассматриваться как бесконечная и вечная, без какого-то момента сотворения и без какого-то «конца», к которому она движется.

Теория Коперника произвела революцию в человеческом мышлении, так как она в конце концов привела к мысли о том, что человека не следует рассматривать как центр мироздания. Потрясающее сознание людей приниженные их роли сильно сказались на всех сторонах их жизни. Нас, однако, интересуют здесь главным образом научные и философские аспекты мировоззрения Коперника. Кратко характеризуя их, можно сказать, что все началось с преобразования понятий и привело в конце концов к краху старых представлений об абсолютных пространстве и времени и к развитию того взгляда, что пространство и время органически связаны.

Объясним этот переход несколько подробнее, ибо он приводит к истоку теории относительности. Суть в том, что раз нет привилегированных положений в пространстве и привилегированных моментов времени, то физические законы можно в равной мере отнести к *любой*

точке, взятый в качестве центра, и из них будут следовать *одни и те же выводы*. В этом отношении ситуация коренным образом отличается от той, которая имеет место в теории Аристотеля, где, например, центру Земли приписывалась особая роль как точке, куда стремится вся материя.

Тенденция к релятивизации, описанная выше, нашла в дальнейшем отражение в законах Галилея и Ньютона. Галилей подробно изучил законы падения тел и показал, что, хотя скорость при этом изменяется со временем, ускорение остается постоянным. До Галилея еще не было четко сформулировано понятие ускорения. Это было, пожалуй, одним из главных препятствий при изучении движения падающих тел, так как без этого понятия нельзя было отчетливо сформулировать главные характеристики такого движения. Галилей понял, что если под постоянной скоростью понимать постоянный темп изменения положения, то постоянным ускорением можно считать постоянный темп изменения скорости, т. е.

$$\frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = a = \text{const.} \quad (2.1)$$

Здесь  $t$  — время, а  $\Delta t$  — его малое приращение;  $v(t)$ , конечно, — скорость в момент времени  $t$ , а  $v(t + \Delta t)$  — скорость в момент времени  $t + \Delta t$ . Отсюда следует, что падение тел характеризуется определенным *соотношением*, которое не связано с какой-либо фиксированной внешней точкой и характеризует лишь свойства движения самого объекта.

Ньютон пошел еще дальше по этому пути, когда сформулировал свой закон движения

$$ma = m\dot{v} = F, \quad (2.2)$$

где  $a = \dot{v}$  — ускорение тела, а  $F$  — сила, действующая на это тело. В этом законе Ньютона содержатся и результаты Галилея, так как ускорение силы тяжести вблизи поверхности Земли постоянно. Вместе с тем Ньютон обобщил здесь закон Галилея, получив соотношение, справедливое для любой силы, как постоянной, так и

переменной. В уравнении Ньютона (2.2) содержится неявно также закон инерции, гласящий, что при отсутствии сил тело движется с постоянной скоростью (или с нулевым ускорением) и будет продолжать такое движение до тех пор, пока какая-нибудь внешняя сила не изменит его скорости.

Законы Ньютона подняли важный вопрос о так называемой «инерциальной системе» отсчета (системе координат), в которой эти законы выполняются. Совершенно очевидно, что если эти законы выполняются в некоторой системе  $S$ , то они в своем прежнем виде не будут выполняться в системе отсчета  $S'$ , движущейся с ускорением. Например, взяв вращающуюся систему отсчета, мы должны включить в уравнение (2.2) центробежную силу и силу Кориолиса. В первом приближении система, связанная с поверхностью Земли, принимается за инерциальную, однако ввиду ее вращения это предположение не вполне обосновано. Ньютон предположил, что удаленные «неподвижные звезды» можно рассматривать как основу для истинно инерциальной системы. Это предположение оправдалось, так как в такой системе орбиты планет, вычисленные из законов Ньютона, чрезвычайно точно совпадают с наблюдаемыми.

Хотя использование «неподвижных звезд» в качестве базиса для инерциальной системы отсчета безукоризненно с практической точки зрения, оно страдает известной теоретической произвольностью, несовместимой с направлением развития механики, т. е. с выражением законов механики только как внутренних взаимоотношений в самой движущейся системе. Здесь мы фактически передали «привилегии» центра Земли неподвижным звездам.

Тем не менее важным завоеванием стала «релятивизация» законов физики, так как они перестали относиться к специально выбранным привилегированным предметам, положениям в пространстве, моментам времени и т. п. Теперь не только больше не было выделенного центра в пространстве и начала во времени, но исчезла и привилегированная в смысле своей скорости система отсчета. Возьмем, например, некоторую систему координат  $x$ , связанную с неподвижными звездами. Вообразим

теперь космический корабль, движущийся относительно этой системы с постоянной скоростью  $u$ . Координаты  $x'$ ,  $t'$ , взятые относительно этого космического корабля, определяются тогда преобразованием Галилея<sup>1)</sup>

$$\begin{aligned}x' &= x - ut, \\v' &= v - u, \\t' &= t.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Иными словами, имеет место линейное сложение скоростей (в согласии со «здравым смыслом»). Особенно следует отметить третье уравнение ( $t' = t$ ), согласно которому ход часов не зависит от относительного движения.

Рассмотрим в этой новой системе отсчета уравнения движения. Вместо уравнения (2.2) мы получим

$$ma' = m \frac{d^2x'}{dt'^2} = m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} = ma = F.\tag{2.4}$$

Таким образом, как в старой, так и в новой системе отсчета действует *один и тот же закон*. В этом и состоит ограниченный принцип относительности. Мы говорим так потому, что законы механики выражаются одними и теми же соотношениями во всех системах отсчета, связанных между собой преобразованиями Галилея.

Тем не менее, чтобы сделать последующее развитие теории ясным, необходимо обратить внимание на то, что ни Ньютон, ни его последователи полностью не понимали релятивистскую сущность динамики, которую они развивали. В самом деле, все были убеждены (что характерно и для Ньютона), что *пространство абсолютно*, т. е. существует само по себе подобно какому-то веществу, и его основные качества и свойства не зависят от его взаимоотношений с чем бы то ни было (например, с находящейся в этом пространстве материей). Подобным же образом они полагали, что «течение» времени абсолютно, равномерно и невозмутимо, что оно безразлично

<sup>1)</sup> Преобразование Галилея в действительности лишь приближенное и справедливо для скоростей, малых по сравнению со скоростью света. Мы увидим позднее, что при больших скоростях вместо него необходимо взять преобразование Лоренца.

к тем действительным событиям, которые в данный момент происходят. Более того, они считали, что по существу нет взаимосвязи между пространством и временем, т. е. что свойства пространства определяются и устанавливаются независимо от движения предметов и существ с течением времени, а ход времени не зависит от пространственных свойств этих предметов и существ. Конечно, инерциальную систему отождествляли с абсолютным пространством и временем.

В некотором роде можно сказать, что Ньютон по-новому продолжил развитие тех аспектов аристотелевских представлений об абсолютном пространстве, которые находились в согласии с физическими фактами, известными в его время. Мы увидим, однако, позднее, что новые данные, обнаруженные в XIX столетии, показали неприемлемость ньютоновских представлений об абсолютном пространстве и времени и привели к релятивистской концепции Эйнштейна.

---

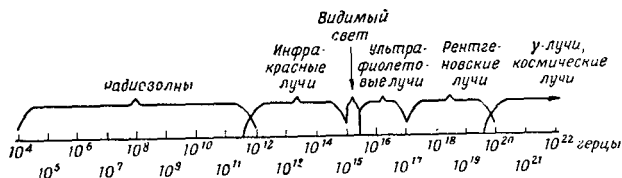
*Вопрос об относительности  
законов электродинамики*

Мы видели, что даже ньютоновская механика содержит много релятивистских черт. Следовательно, релятивистские представления проникли в физику еще до Эйнштейна. Ему принадлежит распространение этих представлений на область электродинамики и оптики, иначе говоря, Эйнштейн явным и последовательным образом заложил основу для важного вывода, что все законы физики представляют собой инвариантные соотношения, связывающие те изменения, которые имеют место в явлениях природы.

Чем была вызвана необходимость распространить релятивистский подход на электродинамику и оптику? Дело главным образом в том, что скорость распространения света конечна, а именно равна  $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/сек. Кроме того, свет первоначально считали состоящим из частиц, имеющих эту скорость, но позднее было обнаружено, что это волновой процесс, при котором может происходить интерференция, дифракция и т. п. Действительно, уравнения Максвелла для векторов напряженностей  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{H}$  предсказывали волны такого рода, причем их скорость определялась отношением электростатических к электромагнитным единицам измерения. Вычисленная отсюда величина скорости совпала с наблюдаемым значением скорости света. Это был сильный аргумент в пользу электромагнитной природы света. Следующим важным шагом в подтверждение этого истолкования было открытие совпадения между наблюдаемыми поляризационными свойствами света и предсказанными теорией электромагнетизма. Световые, инфракрасные и ультра-



фиолетовые лучи, равно как и многие другие виды излучения, были тогда объяснены как электромагнитные волны весьма высокой частоты, излучаемые электронами, атомами и т. д., движущимися в нагретой или каким-либо иным образом возбужденной среде. Позднее в лабораторных условиях были получены электромагнитные волны низкой частоты, но той же природы (радиоволны). Так постепенно был заполнен весь спектр электромагнитного излучения, изображенный на фиг. 1.



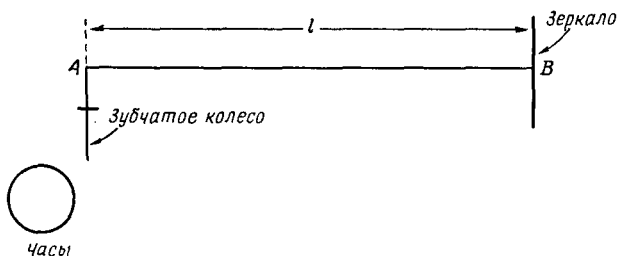
Фиг. 1.

Звуковые волны представляют собой колебания материальной среды, скажем воздуха. Было постулировано, что и электромагнитные волны точно так же распространяются в тончайшей абсолютно проницаемой (заполняющей все пространство) среде, называемой «эфиром». Этот эфир предполагается таким тонким, что планеты движутся в нем без заметного трения. Электромагнитное поле считали некоторым видом натяжений эфира, напоминающим те натяжения, которые бывают в обычных твердых, жидких и газообразных веществах, передающих звуковые волны и механические напряжения. Таким образом, эфир рассматривался как среда, поддерживающая фарадеевы электрические и магнитные «силовые трубки».

Если бы это предположение оправдалось, то галилеев релятивизм механики не мог бы быть справедливым в электродинамике и, в частности, в теории света. Ведь если свет имеет относительно эфира скорость  $c$ , то, согласно закону сложения скоростей Галилея (2.3), эта скорость была бы равна  $c' = c - u$  в той системе отсчета, которая движется относительно эфира со скоростью  $u$ . Тогда уравнения Максвелла должны иметь различный

вид в разных галилеевых системах отсчета, иначе мы не получили бы разного значения скорости света. Законы электродинамики выделяли бы «привилегированную систему отсчета», т. е. ту, которая связана с эфиром.

Сама по себе эта мысль, конечно, не была бы порочной. Например, звуковые волны и в самом деле движутся с некоторой скоростью  $v_s$  относительно воздуха. Если же взять поезд, идущий со скоростью  $u$ , то относительно него скорость внешних звуковых волн равна  $v'_s = v_s - u$ .



Фиг. 2.

Однако не следует забывать, что если воздух на основании многих независимых соображений является хорошо изученной материальной средой, то эфир остается неподтвержденной гипотезой, введенной лишь для того, чтобы объяснить распространение электромагнитных волн. Поэтому необходимо было получить независимое подтверждение его существования и наличия у него каких-то свойств.

Одним из самых очевидных методов такой проверки было измерение скорости света в движущейся системе отсчета. Оно должно было показать, что скорость света  $c'$  относительно движущейся системы равна  $c' - u$ , где  $u$  — скорость системы отсчета. Рассмотрим, например, опыт Физо, представленный на фиг. 2. Свет проходит через вращающееся зубчатое колесо в точке А, покрывает расстояние  $l$  и отражается зеркалом. Скорость вращения колеса подбирается так, чтобы отраженный свет возвращался между следующими двумя зубцами. Взяв подходящие часы, можно измерить скорость вращения

колеса, а на основании ее определить то время  $T$ , за которое наше колесо повернется на один зубец. Тогда скорость света определяется из формулы

$$c = \frac{2l}{T}. \quad (3.1)$$

Известно, что Земля должна двигаться сквозь гипотетический эфир с некоторой переменной и неизвестной скоростью  $v$ . Ясно, однако, что эта скорость будет различаться, например, летом и зимой приблизительно на 60 км/сек. Посмотрим теперь, проявится ли это различие в величине скорости света в результатах наблюдений, проводимых в разные времена года.

Скорость света относительно эфира равна  $c$ ; тогда в лабораторной системе отсчета она будет равна  $c-v$  при движении света навстречу зеркалу и  $c+v$  после отражения. Поэтому полное время  $T$  распространения света туда и обратно равно

$$\begin{aligned} T &= \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} = \frac{2lc}{c^2-v^2} = \frac{2l}{c} \frac{1}{1-(v/c)^2} \approx \\ &\approx \frac{2l}{c} \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} + \dots \right), \end{aligned} \quad (3.2)$$

где мы разложили результат в ряд по степеням малой величины  $v/c$ , ограничившись членами до второго порядка включительно.

Отметим, что наблюдаемый эффект будет пропорционален лишь  $v^2/c^2$  — величине порядка  $10^{-8}$ . В те времена, когда физики приступали к серьезному анализу рассматриваемой проблемы (конец XIX века), такой эффект был слишком слаб, чтобы быть замеченным с помощью существовавших приборов.

---

### Опыт Майкельсона -- Морли

Главное затруднение при проверке гипотезы эфира — это необходимость очень точно измерить величину скорости света. К концу XIX века были разработаны в высшей степени прецизионные интерферометры. Майкельсон и Морли использовали это обстоятельство, чтобы измерить с высокой точностью не саму скорость света, а отношение величин скорости света в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Как мы увидим, это отношение также в принципе может служить для проверки гипотезы эфира.

Экспериментальная установка Майкельсона и Морли схематически изображена на фиг. 3. Свет проходит через полупрозрачное посеребренное зеркало, расположенное в точке *A*. Часть луча распространяется до зеркала *B*, находящегося на расстоянии  $l_1$  от *A*, и отражается обратно. Другая часть луча, дойдя до зеркала *C*, расположенного на расстоянии  $l_2$  от *A*, также отражается обратно. Оба луча вновь встречаются в точке *A* и вместе приходят в точку *D* (фиг. 3), где возникает интерференционная картина. Подсчитывая интерференционные полосы, можно чрезвычайно точно измерить разность оптических путей этих лучей.

Если бы Земля покоилась относительно эфира, а путь  $l_1$  был равен  $l_2$ , то в *D* наблюдалась бы усиливающая интерференция. Допустим, однако, что  $l_1 \neq l_2$  и что Земля движется в направлении оси *x* со скоростью *u*. Время, которое требуется свету на путь от *A* до *B* и обратно, определяется, как и в опыте Физо с зубчатым колесом, по формуле (3.2):

$$t_1 = \frac{2l_1}{c} \cdot \frac{1}{1 - (u/c)^2} \approx \frac{2l_1}{c} \left( 1 + \frac{u^2}{c^2} + \dots \right). \quad (4.1)$$

Пусть время, необходимое свету для распространения от  $A$  до  $C$  и обратно, равно  $t_2$ . Отметим, что пока свет идет от  $A$  до  $C$ , зеркало в точке  $C$  проходит относительно эфира путь  $d = ut_2/2$  в направлении оси  $x$ . Подобным же образом при возвращении света зеркало в точке  $A$  проходит такое же расстояние в направлении оси  $x$ . Тогда, согласно теореме Пифагора, полная длина пути светового луча (туда и обратно) равна

$$L_2^2 = 2 \sqrt{l_2^2 + \frac{u^2 t_2^2}{4}}. \quad (4.2)$$

Учитывая, что скорость света в эфире равна  $c$ , получаем

$$t_2 = \frac{2}{c} \sqrt{l_2^2 + \frac{u^2 t_2^2}{4}}, \quad (4.3)$$

$$t_2^2 \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) = \frac{4l_2^2}{c^2}, \quad (4.4)$$

$$t_2 = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \approx \frac{2l_2}{c} \left(1 + \frac{u^2}{2c^2} + \dots\right). \quad (4.5)$$

Отсюда разность времен равна

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2}{c} \left( \frac{l_1}{1 - (u/c)^2} - \frac{l_2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \right). \quad (4.6)$$

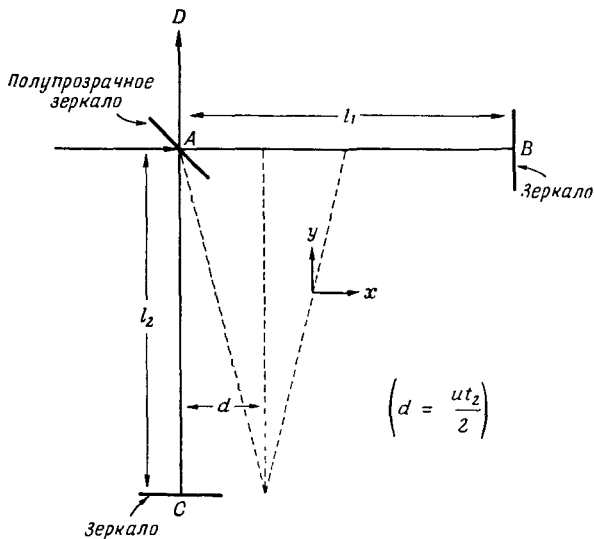
Если  $l_1 = l_2$ , как это и было в действительности, то

$$\Delta t \approx \frac{2l_1}{c} \left(1 + \frac{u^2}{c^2} - 1 - \frac{u^2}{2c^2}\right) = \frac{l_1}{c} \frac{u^2}{c^2}. \quad (4.7)$$

Конечно, величина  $\Delta t$  пропорциональна сдвигу интерференционной полосы.

Предположим теперь, что мы повернули всю установку на  $90^\circ$ . Тогда должна измениться и интерференционная картина. Производя такое вращение установки, можно было бы наблюдать постепенно изменяющийся сдвиг интерференционных линий, положения максимума и минимума которых указали бы направление движения Земли относительно эфира. По величине сдвига можно было бы вычислить саму величину скорости движения Земли  $u$ .

Конечно, случайно могло бы оказаться, что в момент проведения опыта Земля покоится относительно эфира. Тогда при вращении экспериментальной установки не наблюдалось бы заметных изменений. Подождав же 6 месяцев, мы оказались бы в том состоянии, когда скорость



Фиг. 3.

Земли относительно эфира составляет около 60 км/сек, и тогда сдвиг полос наблюдался бы.

Так как предсказываемый сдвиг полос пропорционален  $u^2/c^2$ , он чрезвычайно мал. Однако установка Майкельсона и Морли была достаточно чувствительной для того, чтобы обнаружить предсказываемый сдвиг. Тем не менее, когда опыт был проведен, его результат оказался отрицательным с точностью, допускаемой экспериментом. Ни в какое время года не наблюдалось сдвига интерференционных полос. Более точные опыты того же рода, поставленные позднее, также подтвердили результаты Майкельсона и Морли.

---

## *Попытки спасти гипотезу эфира*

Несомненно, опыт Майкельсона—Морли был одним из самых решающих опытов в современной физике, так как он противоречил некоторым прямым следствиям гипотезы о том, что свет распространяется благодаря наличию эфира. В конце концов этот опыт привел к коренным изменениям наших представлений о пространстве и времени, т. е. к теории относительности. Не следует думать, однако, что физики сразу же переменили свои взгляды благодаря этому опыту. В действительности, и это естественно, было испробовано много других гипотез для того, чтобы либо спасти так или иначе эфир, либо по крайней мере спасти представления «здравого смысла» о пространстве и времени, лежащие в основе законов движения Ньютона, и инвариантность этих законов относительно преобразований Галилея (2.3). Все попытки в конце концов потерпели неудачу или же привели к таким противоречиям, что физики, наконец, сочли более разумным от них отказаться.

Мы дадим здесь резюме некоторых главных попыток подгонки и приспособления, предпринятых для сохранения прежних представлений о пространстве и времени, а также объяснение отрицательных результатов опыта Майкельсона—Морли<sup>1)</sup>.

Проще всего было предположить, что такие тела, как Земля, увлекают при своем движении прилегающий к

---

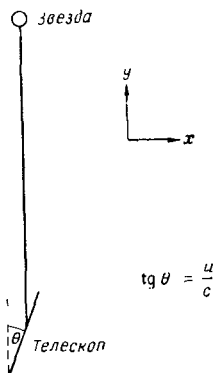
<sup>1)</sup> Более детальный обзор можно найти в следующих книгах: W. Panofsky, M. Phillips, *Classical Electricity and Magnetism*, New York, 1955 (имеется перевод: В. Пановский, М. Филипс, *Классическая электродинамика*, М., 1963. — *Ред.*); С. Möller, *The Theory of Relativity*, Oxford, 1952,

ним эфир подобно тому, как пуля при полете в воздухе увлекает слой воздуха, прилегающий к ее поверхности. В результате измеряемая величина скорости света не должна изменяться в течение года, так как мы все время определяем ее относительно того слоя эфира, который движется вместе с Землей.

Оливер Лодж попытался проверить это предположение, пропуская пучок света вблизи края быстро вращающегося диска. Если бы диск увлекал при своем вращении прилегающий к нему слой эфира, то можно было бы ожидать наблюдаемых эффектов в поведении светового пучка. Однако результаты этого эксперимента были отрицательными.

Вполне естественно появилась мысль, что, хотя небольшой предмет и не может увлечь заметного количества эфира, большое тело, такое, как Земля, способно это сделать. Такое объяснение было все же опровергнуто результатами наблюдений абберации света.

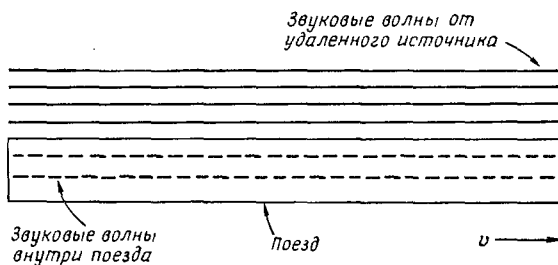
Чтобы разобраться в этом вопросе, вернемся на время к предположению о том, что Земля не увлекает эфир. Пусть она движется относительно эфира со скоростью  $u$  в направлении оси  $x$  (фиг. 4), и пусть некий астроном направляет свой телескоп на далекую звезду, которая для простоты предполагается расположенной в направлении оси  $y$ , перпендикулярном движению Земли. Свет этой звезды попадает к нам через эфир в направлении оси  $y$ , но раз телескоп движется вместе с Землей, его нужно ориентировать под некоторым углом  $\theta$  (обычно весьма малым) относительно оси  $y$ , таким, что  $\theta \approx \text{tg } \theta = u/c$ . Так как от лета к зиме скорость Земли меняется примерно на  $60 \text{ км/сек}$ , видимое угловое положение звезды будет при этом изменяться приблизительно на  $2 \cdot 10^{-4}$  радиан, что может быть обнаружено с помощью хорошего телескопа. Этот сдвиг и был действительно открыт.



Фиг. 4.



Если же Земля увтекает в своем движении прилегающий к ней слой эфира, то мы не обнаружим никакой аберрации (сдвига) видимых положений звезд. Эта ситуация похожа на ту, которая имеет место при попадании звуковых волн на движущийся поезд. Для простоты снова предположим, что волны распространяются перпендикулярно боковым стенкам поезда, исходя от удаленного источника (фиг. 5). Эти волны возбуждают колебания той же самой частоты в стенках и окнах поезда,



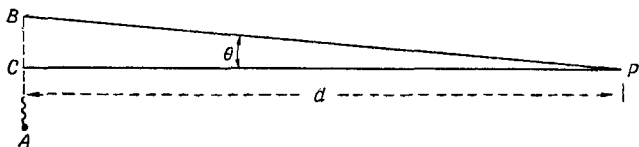
Фиг. 5.

а эти последние в свою очередь заставляют колебаться воздух внутри поезда. Так как первоначальная звуковая волна была плоская, то, очевидно, от стенок поезда будут исходить соответствующие плоские волны в том же самом направлении и внутри поезда. Поэтому изменение скорости хода поезда не вызовет никакого изменения направления звуковых волн внутри поезда. Отсюда совершенно очевидно, что и в случае плоских световых волн, падающих от далекой звезды на движущийся слой эфира близ земной поверхности, направление распространения световых волн никак не будет зависеть от скорости движения Земли.

Как опыт Оливера Лоджа, так и результаты наблюдения аберрации света с достаточной определенностью исключают гипотезу увлечения эфира, следовательно, ее нельзя привлечь для объяснения отрицательных результатов опыта Майкельсона — Морли. Позднее было предложено новое объяснение: возможно, что скорость света

равна  $c$  относительно источника этого света, а не относительно какого-то гипотетического эфира.

Источником большей части света на Земле является, конечно, Солнце, однако солнечный свет подвергается отражению от тел, находящихся на поверхности Земли. Согласно последней теории, такое отражение и будет играть решающую роль при определении скорости света. Поэтому используем ли мы свет лампы или отраженный солнечный свет, следует ожидать, что его скорость относительно Земли будет равна  $c$ , и это объясняет отрицательный результат опыта Майкельсона — Морли.



Фиг. 6.

Эта гипотеза находится в согласии с множеством известных фактов, включая результаты наблюдения аберрации света, но приводит к серьезным затруднениям при объяснении поведения двойных звезд. Чтобы разобраться в этих трудностях, для простоты предположим, что имеются две звезды  $A$  и  $B$  (фиг. 6), обладающие одинаковыми массами. Пусть они движутся вокруг общего центра масс  $C$  по круговой орбите, оставаясь все время друг против друга (аналогичные результаты, как легко видеть, можно получить и в более общем случае). Рассмотрим наблюдателя  $P$ , расположенного на очень большом расстоянии  $d$  от центра  $C$  орбиты этих звезд, так что он видит диаметр этой орбиты под весьма малым углом. Мы будем рассматривать лишь те световые лучи, которые должны достигнуть точки  $P$ . Начнем с тех лучей, которые попадают в  $P$ , будучи испущены в момент  $t_1$ , когда звезды ориентированы вдоль линии  $PC$ , т. е. вдоль луча зрения. На основании элементарной алгебры (включая теорему Пифагора) ясно, что ввиду малости отношения  $v/c$ , где  $v$  — скорость движения звезд по орбите, свет от обеих звезд можно считать распространяющимся

с одной и той же скоростью вдоль линии  $PC$  (здесь мы пренебрегаем членами порядка  $v^2/c^2$ , малыми по сравнению с членами порядка  $v/c$ , которые окажутся важными для нашего анализа). Свету от ближайшей к нам звезды  $A$  требуется для достижения точки  $P$  время

$$T_{1A} = \frac{d-a}{c}, \quad (5.1)$$

где  $a$  — радиус орбиты; свету же от дальней звезды  $B$  для этого необходимо время

$$T_{1B} = \frac{d+a}{c}. \quad (5.2)$$

В процессе движения наших звезд (если скорость света всегда равна  $c$  относительно излучающей этот свет звезды) лучи, попадающие в точку  $P$  от  $A$  и от  $B$ , будут иметь разные скорости. Ясно, что в момент  $t_2$ , когда звезды расположены на линии, перпендикулярной лучу зрения, свет от звезды  $A$ , удаляющейся от наблюдателя  $P$ , будет иметь скорость  $c-v$ , в то время как свет от звезды  $B$ , приближающейся к  $P$ , будет иметь скорость  $c+v$  (мы учли при этом малость угла  $\theta$  и пренебрегли членами порядка  $\theta^2$ ). Эти лучи достигнут точки  $P$  через промежутки времени

$$T_{2A} = \frac{d}{c-v}, \quad T_{2B} = \frac{d}{c+v} \quad (5.3)$$

(в использованном приближении). Наконец, для лучей, испущенных в момент  $t_3$ , когда звезды повернутся еще на  $90^\circ$  и снова будут расположены вдоль луча зрения, получим

$$T_{3A} = \frac{d+a}{c}, \quad T_{3B} = \frac{d-a}{c}. \quad (5.4)$$

Заметим, что разность

$$\Delta T = T_{2A} - T_{1A} = \frac{d}{c-v} - \frac{d-a}{c} \approx \frac{a}{c} - \frac{d}{c} \cdot \frac{v}{c} \quad (5.5)$$

является величиной первого порядка по  $v/c$ . Кроме того, так как  $d$  — расстояние астрономических масштабов, вполне может случиться, что  $d \cdot v/c^2 > a/c$ . В этом случае свет, испущенный звездой  $A$  в момент  $t_2$ , придет в точ-

ку  $P$  раньше, чем свет, испущенный той же звездой в момент  $t_1$ . Поэтому должен существовать период, когда наблюдатель в  $P$  не получает вообще света от звезды  $A$  (подобные же выводы касаются и звезды  $B$ ). Этот эффект должен привести к весьма странному и без труда наблюдаемому изменению яркости двойной звезды, а в действительности его никто не наблюдал. Поэтому мы заключаем, что необходимо отвергнуть гипотезу, согласно которой скорость света равна  $c$  относительно источника.

---

## *Лоренцева теория электрона*

Совершенно другую попытку примирения гипотезы эфира с экспериментальными фактами (например, упоминавшимися в гл. 4 и 5) развил Лоренц. Как мы увидим, теория Лоренца действительно привела к такому «примирению». Однако при этом появились новые проблемы, гораздо более глубокие и касающиеся природы пространственно-временных измерений, что и послужило основой для принципиально новых эйнштейновских представлений о пространстве и времени.

Хотя теория Лоренца в настоящее время уже не является общепринятой, полезно разобрать некоторые ее детали не только для понимания исторических условий, в которых возникла теория относительности, но главным образом для выяснения основного содержания нового эйнштейновского подхода ко всей проблеме. Именно критический анализ теории Лоренца на базе уже знакомых и общепринятых физических представлений дает возможность лучше уяснить, что являлось ошибочным в ньютоновских понятиях пространства и времени, и предсказать то большое число изменений, которое необходимо сделать, чтобы избежать трудностей, связанных с этими понятиями.

Лоренц начал с того, что принял гипотезу эфира. Главным же новшеством в его теории было изучение зависимости процесса пространственно-временного измерения от взаимосвязи между атомным строением вещества и движением вещества в эфире.

Уже было известно, что вещество состоит из атомов, содержащих отрицательно заряженные частицы, именуе-

мые электронами. и положительно заряженные образования (Резерфорд в 1911 г. показал, что последние имеют вид малых ядрышек), к которым притягиваются электроны. Межатомные силы, ответственные за объединение атомов в молекулы, а затем и в макроскопические твердые тела, весьма правдоподобно объяснялись как результат действия сил притяжения между электронами и положительно заряженной частью атома и сил отталкивания между электронами. Рассмотрим, например, кристаллическую решетку. Расположение точек, в которых электрические силы взаимно нейтрализуются, определяет расстояние  $d$  (постоянную решетки) между соседними атомами. Таким образом можно определить и размеры кристалла, содержащего заданное число атомных слоев в каждом данном направлении.

Лоренц предположил, что электрические силы в сущности представляют собой натяжения эфира. Из уравнений Максвелла (считая их справедливыми в той системе отсчета, в которой эфир покоится) можно вычислить электромагнитное поле, окружающее заряженную частицу. Для частицы, которая покоится относительно эфира, следует, что напряженность этого поля определяется потенциалом  $\varphi$ , являющимся сферически симметричной функцией расстояния  $R$  от заряженной частицы, а именно  $\varphi = q/R$  (где  $q$  — заряд частицы). Если провести подобный же расчет для частицы, движущейся относительно эфира со скоростью  $v$ , то мы найдем, что поле вокруг частицы уже не будет сферически симметричным. Оно будет обладать симметрией эллипсоида вращения, диаметры которого в направлениях, перпендикулярных скорости, совпадают с диаметром прежней сферы, а диаметр в направлении движения укорочен в  $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$  раз. Такое сокращение, очевидно, имеет место в результате движения электронов в эфире.

Электрический потенциал, образованный всеми атомами кристалла, представляет собой не что иное, как сумму потенциалов всех частиц, из которых образован кристалл. Следовательно, вся система эквипотенциальных поверхностей также должна сжаться в направлении движения и остаться без изменения в перпендикулярных направлениях, как это произошло с полем отдельного

электрона. Равновесные положения атомов соответствуют тем точкам, где потенциал минимален (где результирующая сила равна нулю). Поэтому, когда эквипотенциальные поверхности сжимаются в направлении движения, должно произойти и соответствующее сжатие самого тела в том же направлении, т. е. тело укоротится в  $1/\sqrt{1-(v/c)^2}$  раз. В результате длина линейки  $l_0$ , которую она имела в состоянии покоя, при движении со скоростью  $v$  в направлении длины уменьшится и будет равна

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}. \quad (6.1)$$

Если же наша линейка ориентирована перпендикулярно направлению движения, то ее длина, конечно, не изменится.

Вернемся к опыту Майкельсона — Морли. Так как плечи интерферометра состоят из атомов, нужно ожидать, что они подвергнутся такому же сокращению, какое описывается формулой (6.1). Укоротится, однако, длина лишь того плеча, которое параллельно направлению движения. Так как мы предполагали, что длина обоих плеч в состоянии покоя одинакова, уравнение (4.6) следует переписать в виде

$$l_1 = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}, \quad l_2 = l_0, \quad (6.2)$$

откуда

$$\Delta t = \frac{2l_0}{c} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \right) = 0. \quad (6.3)$$

Мы показали, таким образом, что независимо от величины скорости Земли установка Майкельсона — Морли не должна давать никакого сдвига интерференционных полос. Следовательно, теория эфира совместима с результатами опыта Майкельсона — Морли. Конечно, такое «примирение» является прямым следствием эффекта, получившего с тех пор название *лоренцева сокращения* тела при его движении в эфире<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Ранее без всякого обоснования подобное сокращение *ad hoc* предложил Фитцджеральд, но впервые теоретически оно было обосновано Лоренцем.

---

*Дальнейшее развитие  
теории Лоренца*

Описанный в гл. 6 подход был многообещающим, однако сам по себе он еще не приводил к полной оценке всех факторов, которые связаны с рассматриваемой проблемой. Хотя во времена Лоренца были невозможны непосредственные измерения скорости света с требуемой степенью точности, этот подход все же должен был, очевидно, предсказать, что дали бы такие измерения, если бы они стали возможными (какими они являются теперь). Казалось, что скорость движения Земли  $v$  относительно эфира можно было измерить с помощью прецизионного опыта Физо, учитывая члены порядка  $v^2/c^2$  в формуле (3.2).

Чтобы решить эту проблему, Лоренц должен был рассмотреть не только сокращение длины линейки при ее движении в эфире, но и возможный соответствующий эффект для часов (так как для измерения скорости света таким способом нужны *не только линейка, но и часы*). Эта проблема довольно-таки сложна, и мы лишь кратко обрисуем ее основные черты.

В качестве типичных часов возьмем гармонический осциллятор, движение которого описывается уравнением

$$m\ddot{x} = -kx,$$

где  $m$  — масса осциллятора, а  $k$  — коэффициент жесткости. Период осциллятора равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (7.1)$$

Посмотрим сначала, что происходит с массой движущегося электрона. Когда мы ускоряем электрон, вокруг



него создается магнитное поле, постепенно возрастающее с увеличением скорости. Как хорошо известно, всякое изменение магнитного поля вызывает появление электрического поля. Согласно закону Ленца, это электрическое поле оказывается таким, что оно *противодействует* электродвижущей силе, вызвавшей первоначальный рост магнитного поля. Иными словами, электромагнитным явлениям свойствен род инерции — электромагнитное поле противится попыткам его изменить, например катушка обладает свойством индуктивности. В случае электрона такая инерция проявляется как сопротивление ускорению. Подробный расчет, который выходит за пределы этой работы, показывает, что на электрон, имеющий ускорение  $\mathbf{a}$ , действует «возвращающая сила»

$$\mathbf{F}_l = -\lambda \mathbf{a}, \quad (7.2)$$

где  $\lambda$  — постоянная, зависящая от размеров электрона и распределения заряда электрона. (Для медленно движущегося заряда  $q$ , равномерно распределенного на сфере радиуса  $r_0$ ,  $\lambda \approx q^2/r_0$ .) Уравнение движения такого электрона имеет вид

$$m_m \mathbf{a} = -\lambda \mathbf{a} + \mathbf{F}. \quad (7.3)$$

Здесь  $m_m$  — обычная «механическая» масса, а  $\mathbf{F}$  — приложенная сила (не включающая «возвращающей силы» реакции на изменение поля самого электрона). Это уравнение можно переписать в форме

$$(m_m + \lambda) \mathbf{a} = \mathbf{F}, \quad \text{или} \quad m \mathbf{a} = \mathbf{F}, \quad (7.4)$$

где

$$m = m_m + \lambda.$$

Заметим, что в полученном уравнении движения фигурирует *эффективная масса*  $m$ , которую можно также назвать *наблюдаемой массой*. Определяя силу, необходимую для того, чтобы ускорить частицу, мы измеряем именно эту массу. Величина  $\lambda$  носит название «электромагнитной массы», которую необходимо, очевидно, добавить к  $m_m$  для получения эффективной массы.

Подобная эффективная масса известна и в гидродинамике, где, как мы видели, летящая пуля увлекает прилегающий слой газа (или жидкости) и, следовательно, больше сопротивляется ускорению, чем такая же пуля,

движущаяся в пустоте. Можно сказать, что электромагнитное поле, окружающее электрон, вносит аналогичным образом вклад в его инерцию.

Проведенное рассмотрение говорит о тесной связи между уравнениями механики и электродинамики. Важность этой связи стала бы еще более значительной, если бы мы могли найти способ отделить  $m_m$  от  $\lambda$ . Согласно Лоренцу, в принципе должно быть возможным такое отделение. Так, с одной стороны, дальнейшие вычисления, основанные на теории Лоренца, показали, что электромагнитная масса  $\lambda$  является функцией скорости частицы относительно эфира:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (7.5)$$

Здесь  $\lambda_0$  — электромагнитная масса электрона, покоящегося относительно эфира. С другой стороны, согласно ньютоновским представлениям, механическая масса должна быть константой, не зависящей от скорости. Поэтому эффективную массу можно записать в виде

$$m = m_m + \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (7.6)$$

Исследуя изменения эффективной массы со скоростью, можно отделить механическую массу  $m_m$  от электромагнитной массы  $\lambda_0/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ . Такое исследование действительно было проведено при помощи измерения отношения  $e/m$  в катодных лучах. Опыты показали, что эффективная масса действительно возрастает с ростом скорости в  $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$  раз. Отсюда можно заключить, что либо масса электрона целиком электромагнитного происхождения, либо (по неизвестным причинам) чисто механическая масса  $m_m$  также пропорциональна  $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ . Если говорить лишь о законах механики, то обе эти гипотезы ведут к одинаковым следствиям, так что при настоящем обсуждении нет необходимости разбираться дальше в вопросе происхождения массы. Достаточно отметить, что *в действительности*

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (7.7)$$

где  $m_0$  — наблюдаемая масса частицы, покоящейся относительно эфира.

Так как в часах, движущихся в эфире, масса каждой частицы становится больше, то очевидно, что такие часы должны идти (колебаться) замедленно. Однако для вычисления периода этих часов необходимо было бы учесть не только изменение массы, но и изменение коэффициента упругости  $k$ . Для этого потребовалось бы довольно сложное исследование поведения межатомных сил при движении в эфире, что привело бы к слишком длинному обсуждению, дать которое здесь мы не можем.

В результате такого исследования был получен закон

$$k = k_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

откуда следует

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (7.8)$$

где  $T_0$  — период наших часов, когда они покоятся относительно эфира, а  $T$  — их период, когда они движутся в эфире. Итак, замедление хода движущихся относительно эфира часов пропорционально

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (7.9)$$

Исследователь, движущийся вместе с лабораторией, состоит сам также из атомов. Значит, и его тело должно укоротиться во столько же раз, во сколько укоротятся его линейки, так что он не заметит какого-либо изменения. Подобным же образом все физико-химические процессы, протекающие в нем самом, замедлятся во столько же раз, во сколько замедлятся его часы. Повидимому, мыслительные процессы этого исследователя также замедлят свой ход, и он не почувствует изменения скорости хода своих часов. Поэтому он будет приписывать своим линейкам ту же длину  $l_0$ , которой они обладали, когда покоились относительно эфира, и тот же период  $T_0$  — своим часам. Все это необходимо учитывать при истолковании его экспериментальных результатов.

Вернемся теперь к измерению скорости света по методу Физо. Так как свойства часов и линеек, находящихся

в лаборатории, движущейся вместе с поверхностью Земли, изменились, то лучше описывать этот опыт, представив себе, что имеется система отсчета, покоящаяся относительно эфира. В этой системе скорость света равна  $c$ . Пусть световой луч проходит через зубчатое колесо в момент  $t=0$  в системе отсчета, связанной с эфиром (см. фиг. 2). Предположим, что поверхность Земли, а с ней и лаборатория движутся в эфире со скоростью  $v$ . Пусть время, необходимое свету, чтобы пройти от  $A$  до зеркала  $B$ , от которого он отражается, равно  $t_1$ . Имея в виду движение лаборатории, получаем

$$l + vt_1 = ct_1, \quad \text{или} \quad t_1 = \frac{l}{c-v}. \quad (7.10)$$

Подобным же образом для времени, в течение которого луч проходит обратный путь, найдем

$$t_2 = \frac{l}{c+v}$$

и

$$T = t_1 + t_2 = \frac{2l}{c} \frac{1}{1-(v/c)^2}. \quad (7.11)$$

Вспомним теперь, однако, что истинная длина линейки сократилась до

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

в то время как период часов достиг величины

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Подставляя эти значения в уравнение (7.11), получаем

$$\frac{T_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{2l_0}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

или

$$T_0 = \frac{2l_0}{c}. \quad (7.12)$$

Найденный результат не зависит от скорости лаборатории относительно эфира. Но если наблюдатель, находящийся в лаборатории, не знает, что происходит с его

линейками и часами, и измеряет скорость света в предположении, что они неизменны, он, конечно, также найдет эту скорость равной  $2l_0/T_0$ . Мы доказали, таким образом, что ввиду лоренцева сокращения и замедления хода часов *все наблюдатели при измерении скорости света по методу Физо получают один и тот же результат*, если каждый из них считает, что его аппаратура работает правильно. Отсюда ясно, что *опыт Физо нельзя использовать для определения скорости движения Земли относительно эфира*, так как результат опыта не зависит от этой скорости.

---

*Проблема определения  
одновременности  
в теории Лоренца*

В гл. 6 и 7 было показано, что скорость движения Земли относительно эфира нельзя определить ни с помощью опыта Майкельсона — Морли, ни с помощью опыта Физо. Однако очевидно, что эта скорость играет важную роль в теории Лоренца. Ведь, не зная ее, мы не можем найти поправку к показаниям наших линеек и часов, чтобы измерить «истинную длину» и «истинное время», которые нам дали бы линейки и часы, покоящиеся относительно эфира.

Чтобы лучше понять эту проблему, рассмотрим еще один способ измерения скорости света. Возьмем две точки  $A$  и  $B$ , находящиеся друг от друга на расстоянии  $l_0$ , измеренном в лабораторной системе отсчета. Пусть лаборатория движется относительно эфира вдоль линии, соединяющей  $A$  и  $B$ , со скоростью  $v$ . Пошлем световой сигнал из  $A$  в  $B$  и измерим время  $t_0$  (по лабораторным часам), необходимое для того, чтобы сигнал прошел от  $A$  до  $B$ . Измеренная таким образом скорость света будет равна

$$c_m = \frac{l_0}{t_0}. \quad (8.1)$$

Если бы нам удалось показать, что измеренная скорость зависит от скорости движения лаборатории относительно эфира и это можно как-то учесть, то проблема определения относительной скорости была бы разрешима. Тогда можно было бы внести поправки и в показания наших линеек и часов, приведя их к «истинным длинам» и к «истинным временам».

Мы могли бы в принципе провести этот опыт, если бы в точках  $A$  и  $B$  можно было поместить эквивалентные друг другу и точно *синхронизованные* часы. Тогда разность показаний часов в точке  $A$  при отправлении сигнала и часов в точке  $B$  при его поступлении была бы равна  $t_0$ . Но каким способом синхронизовать эти часы? Обычно пользуются радиосигналами, но этот способ здесь, очевидно, неприменим, так как радиоволны распространяются со скоростью света, которую мы как раз и пытаемся найти в этом опыте. Поэтому предложим другой, чисто механический способ синхронизации часов. Построим двое одинаковых часов, поместим их рядом друг с другом и синхронизируем. Проверив, что они идут одинаково, очень медленно и осторожно удалим их друг от друга так, чтобы не нарушить движения внутренних механизмов тряской и ускорениями. При этом, по крайней мере если основываться на обычно принятых принципах ньютоновской механики, равно как и на «здоровом смысле», наши часы должны продолжать идти одинаково и после их удаления друг от друга, т. е. идти синхронно. Чтобы убедиться в этом, нам следует вновь сблизить их таким же образом и посмотреть, продолжают ли они показывать одно и то же время.

Посмотрим теперь, что случилось бы с этими часами, если бы они находились в лаборатории, движущейся относительно эфира со скоростью  $v$ . Мы снова будем рассуждать с точки зрения наблюдателя, покоящегося относительно эфира. Когда первоначально наши часы были рядом и подвергались сравнению, мы видели, что они идут медленнее таких же часов, покоящихся в эфире, в  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$  раз. Затем, оставив часы  $A$  на прежнем месте в лаборатории, будем перемещать часы  $B$ . При движении скорость их относительно эфира равна  $v + \delta v$ . Чтобы гарантировать постепенный и осторожный характер движения, предположим, что  $\delta v \ll v$ . Если  $l$  — максимальное расстояние между часами, измеренное в системе, связанной с эфиром, а  $\tau$  — время (также измеренное в системе отсчета, покоящейся относительно эфира), требующееся на то, чтобы раздвинуть часы на это расстояние, то

$$l = \delta v \cdot \tau. \quad (8.2)$$

При удалении часов друг от друга скорость их хода должна быть несколько различной. Действительно, если  $\nu_0 = 1/T_0$  — частота хода часов, покоящихся относительно эфира, то «истинная» частота часов  $A$ , наблюдаемая в системе отсчета, связанной с эфиром, равна

$$\nu_A = \nu_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}. \quad (8.3)$$

Для часов  $B$  подобным же образом получаем

$$\nu_B = \nu_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v + \delta v}{c}\right)^2}. \quad (8.4)$$

Разлагая последнее выражение в ряд по степеням  $\delta v$  и ограничиваясь первой степенью, находим

$$\nu_A - \nu_B \approx \frac{\delta v \cdot \nu_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \frac{v}{c^2} = \frac{\delta v \cdot \nu_A}{1 - (v/c)^2} \frac{v}{c^2}. \quad (8.5)$$

Если на весь процесс разнесения часов требуется время  $\tau$ , то соответствующая разность фаз будет равна

$$\Delta\varphi = (\nu_A - \nu_B) \tau = \frac{\nu_A \cdot \tau \cdot \delta v}{1 - (v/c)^2} \frac{v}{c^2} = \frac{\nu_A \cdot l}{1 - (v/c)^2} \frac{v}{c^2}. \quad (8.6)$$

Тогда разница в показаниях часов составит

$$t_A - t_B = \frac{\Delta\varphi}{\nu_A} = \frac{l}{1 - (v/c)^2} \frac{v}{c^2}. \quad (8.7)$$

Подставляя сюда

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

получаем

$$t_A - t_B = \frac{l_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \frac{v}{c^2}. \quad (8.8)$$

Мы видим, что наши часы рассинхронизуются на величину, пропорциональную их удалению  $l_0$  и скорости относительно эфира  $v$ . При малой относительной скорости часов  $\delta v$ , когда быстрота их хода остается почти одинаковой в процессе удаления, соответственно растет время их относительного движения  $\tau = l/\delta v$ , так что полный относительный сдвиг фазы не зависит от  $\delta v$ . Заметим, что



вследствие подобных же соображений при последующем сближении наши часы вновь синхронизируются и будут показывать одно и то же время.

Конечно, при больших значениях  $dv$  следует учесть дальнейшие члены в разложении по степеням  $dv$ , вследствие чего разность фаз наших часов окажется довольно сложной функцией и уже не будет определяться формулой (8.6). Позднее мы покажем (см. гл. 28), что при стремлении  $dv$  к  $c$  удаленные друг от друга часы при последующем сближении уже не будут показывать одинакового времени. Однако теперь мы ограничимся случаем малых  $dv$ , так что формулы (8.6) — (8.8) будут справедливы.

Проведенное выше рассмотрение показало, что если даже двое часов сделаны совершенно одинаково и, находясь рядом, идут с одной и той же скоростью, то при разнесении их в разные точки синхронизм часов нарушается и они будут показывать разное время, хотя при обратном сближении синхронизм восстанавливается (предполагается, что относительная скорость  $dv$  мала). Наблюдатель в лабораторной системе отсчета (движущейся, вообще говоря, относительно эфира), который не знает об этом сдвиге фаз, назовет одновременным те два события, для которых часы  $A$  и  $B$  показывают одинаковое время. Значит, он ошибется при определении одновременности событий.

Попытаемся найти связь между отсчетами времени наблюдателя в лаборатории и отсчетами «истинного» времени, которые дают часы, покоящиеся относительно эфира [заметим, что, согласно формуле (8.8), при  $v=0$  удаленные друг от друга часы сохраняют синхронизм, так что покоящиеся в эфире часы измеряют «истинное» время, даже если они находятся в разных местах]. Теперь следует ввести для лабораторных часов не только поправку типа

$$t' = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

но и поправку на одновременность в разных точках; из уравнения (8.8) видно, что перенесенные часы показывают *меньшее* время, чем оставшиеся на месте, так что

к  $l'$  следует добавить поправку (8.8). Поэтому получаем

$$t = \frac{t_0 + (vl_0/c^2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (8.9)$$

Вернемся теперь к вопросу об измерении скорости света путем посылки сигнала из точки  $A$  и определения времени, которое потребуется ему для того, чтобы пройти уже измеренное расстояние до  $B$ . Предположим, что расстояние и время, измеренные с помощью лабораторной аппаратуры, соответственно равны  $l_0$  и  $t_0$  и дают измеренную скорость света

$$c_m = \frac{l_0}{t_0}.$$

Допустим также, что наша лаборатория движется относительно эфира со скоростью  $v$  в направлении прямой, соединяющей  $A$  и  $B$ . Пусть «истинное» расстояние между  $A$  и  $B$  равно  $l$ . Из-за движения лаборатории свет должен, однако, пройти расстояние

$$l' = l + vt,$$

где  $t$  — «истинное» время, которое требуется ему, чтобы пройти от  $A$  до  $B$ . Так как  $l' = ct$ , то получим

$$l = (c - v)t.$$

На основании соотношения (8.9) и формулы

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

мы придем, однако, к выражению

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} l_0 = \frac{(c - v)[t_0 + (vl_0/c^2)]}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

$$l_0 = ct_0. \quad (8.10)$$

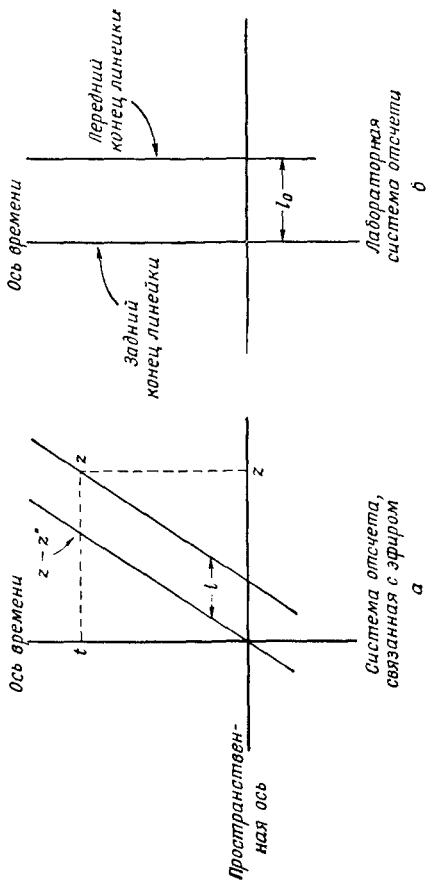
Сравнивая этот результат с (8.1), видим, что движущийся наблюдатель будет постоянно получать одну и ту же величину измеренной скорости света ( $c_m = c$ ) независимо от скорости своего движения в эфире.

## Преобразования Лоренца

В гл. 6—8 мы видели, что в соответствии с теорией Лоренца различные естественные методы определения скорости света относительно эфира (опыт Майкельсона — Морли, опыт Физо с зубчатым колесом и метод непосредственного измерения времени распространения светового сигнала между двумя точками) приводят к результатам, не зависящим от скорости движения измерительной аппаратуры. Возникает вопрос: *существует ли вообще такой эксперимент*, результаты которого зависели бы от скорости движения лаборатории относительно эфира, что позволило бы измерить эту скорость? В настоящей главе будет показано, что, согласно теории Лоренца, такого эксперимента осуществить нельзя.

Мы начнем здесь с того, что отыщем связь (фиг. 7) между координатами  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  некоторого события и соответствующим ему временем  $t'$  (координаты и время измеряются приборами, движущимися вместе с лабораторией в эфире), с одной стороны, и «истинными» координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и «истинным» временем  $t$  этого же события (координаты и время измеряются такими же приборами, покоящимися относительно эфира), с другой стороны.

Для удобства рассмотрим такие две системы координат, в которых данное событие имеет соответственно координаты  $x'=y'=z'=t'=0$  и  $x=y=z=t=0$ . Пусть скорость лаборатории равна  $v$  и направлена по оси  $z$ . Если взять в лабораторной системе отсчета закрепленную линейку, один конец которой находится в точке  $z'=0$ , а другой — в точке  $z'=l_0$ , то, используя выражение (8.9),



Фиг. 7.

сразу получим искомую формулу для времени  $t$  в точке  $z' = l_0$ :

$$t = \frac{t' + (vz'/c^2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (9.1)$$

Так как  $x$  и  $y$  не меняются при движении в направлении оси  $z$ , то следует записать

$$x = x', \quad y = y'. \quad (9.2)$$

Вопрос теперь лишь в том, чтобы найти соответствующее выражение для  $z$  через  $z'$  и  $t'$ . Проще, однако, подойти к этой задаче, выражая  $z'$  через  $z$  и  $t$ . Для этого мы вспомним сначала, что в системе отсчета, связанной с эфиром, наша линейка движется вдоль оси  $z$  со скоростью  $v$ . Для простоты положим, что в момент  $t=0$  один конец линейки находится в точке  $z=0$ . Согласно нашему выбору начал обеих систем координат, это соответствует в лабораторной системе  $z'=0$  и  $t'=0$ . Если к тому же передний конец линейки попадает в момент  $t$  в точку  $z$  (это соответствует  $t'$  и  $z'$  в лабораторной системе), то истинная длина линейки будет равна  $z'' = z - vt$  (мы учли тот факт, что линейка движется). Имея в виду лоренцево сокращение, получаем

$$z'' = z' \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

или

$$z' = \frac{z - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (9.3)$$

Подставляя сюда  $t$  из (9.1), находим

$$z' = -\frac{v^2}{c^2} \frac{z'}{1 - (v/c)^2} - \frac{vt'}{1 - (v/c)^2} + \frac{z}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (9.4)$$

Простое преобразование дает

$$z = \frac{z' + vt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (9.5)$$

Формулы (9.1), (9.2) и (9.5) выражают зависимость  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$  от  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ,  $t'$  и определяют, таким образом, преобразование от „истинных“ координат к тем координатам, которые измеряются наблюдателем, движущимся

щимся относительно эфира со скоростью  $v$  в направлении оси  $z$ . Это и есть *преобразование Лоренца*.

Мы можем, напротив, исключить из (9.1)  $z'$  и получить

$$t' = \frac{t - (vz/c^2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (9.6)$$

Теперь формулы (9.3), (9.6) и (9.2) выражают зависимость  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ,  $t'$  от  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$ . Это — *обратное* преобразование Лоренца, переводящее  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$  в  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ,  $t'$ . Прямое и обратное преобразования, конечно, эквивалентны друг другу, так как следуют одно из другого.

Рассмотрим теперь волну света, испущенную из начала координат ( $x=y=z=0$ ) в момент  $t=0$ . В эфире свет распространяется со скоростью  $c$ , и поверхность фронта волны описывается уравнением

$$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0. \quad (9.7)$$

Перепишем его теперь в переменных  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ,  $t'$ . С помощью формул (9.1), (9.2) и (9.5) получим

$$c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = 0. \quad (9.8)$$

Отсюда видно, что фронт волны имеет вид сферы и в системе  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ,  $t'$ , т. е. он распространяется с «измеренной скоростью»  $c$ . Этот вывод означает, что благодаря изменению длины линейки и хода часов, вызванному движением относительно эфира, в теории Лоренца *все равномерно движущиеся наблюдатели получают одну и ту же величину скорости света независимо от скорости их движения в эфире*. Мы обобщили, таким образом, результаты гл. 6—8, где было показано, почему конкретные методы измерения скорости света приводят к значениям, не зависящим от скорости движения лабораторной системы отсчета.

---

*Неопределенность,  
внутренне присущая значениям  
пространственно-временных  
измерений в теории Лоренца*

Анализ, приведенный в гл. 6—9, показывает, что, согласно теории Лоренца, все измерения скорости света должны давать один и тот же результат независимо от того, с какой скоростью движется лаборатория относительно эфира. Тем не менее все законы и уравнения этой теории формулируются на языке «истинных» длин и промежутков времени, которые измеряются линейками и часами, покоящимися относительно эфира. Поэтому, чтобы узнать истинное значение измеренных нами длин, необходимо ввести в них поправку, т. е. учесть эффекты движения аппаратуры. Если теория Лоренца верна, то не может существовать способа для такого корректирования наблюдаемых длин и интервалов времени. Поэтому «истинные» длины и отрезки времени внутренне неопределенны, ибо они не входят ни в одно из наблюдаемых соотношений, сопоставимых с результатами реальных измерений и опытов.

Какую же роль могут играть эти «истинные» длины и отрезки времени, для измерения которых требуются линейки и часы, находящиеся в покое относительно эфира? Если вспомнить, что эфир — это к тому же чисто гипотетическое понятие, что его существование не подтверждено никакими независимыми наблюдательными фактами, положение становится особенно тяжелым. Имеют ли какое-либо значение вообще эти «истинные» длины и отрезки времени? Может быть, они — чисто концептуальные изобретения, наподобие тех пунктирных линий, которые нам случается мысленно проводить, когда

мы применяем геометрические теоремы к реальным объектам?

Это не чисто теоретическая проблема, порожденная лишь анализом теории Лоренца. Это также проблема практическая. Ведь опыт Майкельсона — Морли на самом деле дает результат, не зависящий от скорости движения Земли, как того и требует теория Лоренца. Во времена Лоренца опыт Физо с зубчатым колесом еще не давал той степени точности, которая требуется для проверки теории. Теперь же, когда чрезвычайной точности достигли электронные методы детектирования световых импульсов, эти эксперименты также показывают, что измеряемая скорость света не зависит от скорости движения Земли. Более того, как мы увидим позднее, теория относительности Эйнштейна, основанная на предположении о том, что при измерении скорости света все наблюдатели должны получить один и тот же результат, подтверждается столь обширным количеством различного рода экспериментов, что лежащее в ее основе предположение можно считать окончательно проверенным. Следовательно, не только теория Лоренца, но и существующие экспериментальные факты приводят к вопросу: как измерять те «истинные» длины и отрезки времени, которые относятся к системе отсчета, связанной с эфиром?

Заметим здесь кстати, что до сих пор не было сделано *непосредственного* измерения скорости распространения света между двумя точками. Причина этого лежит, вероятно, в технических трудностях синхронизации (без использования электромагнитных сигналов) удаленных друг от друга часов. Появление в высшей степени прецизионных цезиевых часов приблизило реализацию такого эксперимента. Однако, имея в виду многочисленные подтверждения указанных выводов, уже содержащиеся в других опытах, едва ли можно предположить, что этот эксперимент приведет к результату, зависящему от скорости движения лаборатории относительно гипотетического эфира.



---

*Анализ понятий  
пространства и времени  
на языке систем отсчета*

Мы увидели в предыдущей главе, что как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения прежние представления о пространстве и времени завели нас в тупик в отношении фундаментальных вопросов, связанных с сущностью понятий, лежащих в основе как физики, так и большей части нашей повседневной технической и индустриальной деятельности. Возникла новая по своему характеру проблема. Дело в том, что теорию Лоренца нельзя было обвинить в несогласии с опытом. Напротив, эта теория подтверждалась всей совокупностью экспериментальных данных, полученных во времена Лоренца, да и данными всех последующих экспериментов. Трудность состояла в том, что входящие в теорию Лоренца *фундаментальные понятия*, т. е. «истинное» время и «истинные» пространственные координаты, измеряемые приборами, покоящимися относительно эфира, оказались *совершенно неопределенными*. Мы обнаружили, что из самой теории Лоренца следует невозможность приведения показаний лабораторной аппаратуры к «истинным» пространственным и временной координатам. Но если эти свойства «эфирной» системы отсчета выпадают из результатов наблюдений, то *ничего не изменится, если мы станем считать, что такой системы вообще не существует*.

Конечно, если бы оказалось, что какие-то свойства эфира поддаются наблюдению, то эфир следовало бы снова признать физической реальностью. Но так как невозможно наблюдать *ни одного* из его свойств, то можно сказать, что вся его роль сводится к тому, чтобы быть

носителем тех понятий абсолютных пространства и времени, на которых основывается ньютоновская механика. Более того, попытки соотносить эти последние понятия с наблюдаемой реальностью привели, как мы видели, к такой путанице, что стало вообще не ясно, какой смысл вкладывать в понятия пространства и времени вообще и для чего служат эти фундаментальные понятия.

Представляется очевидным, что необходимо найти новый подход ко всей проблеме, который исходил бы не из гипотезы эфира, не поддающейся проверке, а, насколько это возможно, из твердо установленных фактов и из тех гипотез, которые могут быть экспериментально проверены, по крайней мере *в принципе*. Чтобы расчистить путь для такого подхода, приступим к предварительному анализу некоторых основных фактов, на базе которых мы пользуемся пространственными и временной координатами.

Первое обстоятельство, затрагивающее поставленный вопрос, состоит в том, что пространственные и временная координаты описывают *взаимосвязи* предметов и событий с некоторым типом измерительных приборов, сделанных самими экспериментаторами. Например, чтобы измерить длину какого-то предмета, требуется достаточно жесткая линейка, и мы должны (приблизительно) найти, на сколько делений этой линейки отстоят друг от друга начало и конец предмета. В ином случае можно наблюдать этот предмет в телескоп и измерять тот угол, под которым виден предмет, считая, что свет распространяется по прямой. Проведя наблюдения из ряда точек, расстояния между которыми известны, можно затем вычислить длину предмета, пользуясь геометрией Евклида. Что касается измерения времени, то нам, конечно, понадобятся какие-нибудь часы, которые могут содержать маятник или гармонический осциллятор. Кроме того, в качестве часов можно использовать какой-нибудь естественный процесс, например период вращения Земли вокруг оси или время полураспада какого-либо радиоактивного элемента.

Безусловно, недостаточно говорить лишь о результатах какого-то отдельного измерения. Наши измерения приобретают реальную значимость только благодаря

тому, что, наблюдая пространственные и временные отрезки разными способами при помощи различных методов и инструментов, мы получаем согласующиеся результаты. Например, измеряя один и тот же предмет разными линейками, получаем одно и то же значение его длины с точностью до тех погрешностей или ошибок, которые свойственны данной линейке. Мы найдем практически то же значение длины этого предмета и в том случае, когда обратимся к методу триангуляции, используя свойства световых лучей, или к другим методам. Этот вывод может показаться очевидным или даже тривиальным, но он тем не менее представляет собой *факт* исключительной важности, и не только для науки, но и для всего нашего существования. Например, возможность производить машины со взаимозаменяемыми частями в конечном счете связана с тем, что при измерении величины одной части мы получаем значение, совпадающее со значением, найденным при измерении другой части, которая, например, должна входить в первую. Было бы нетрудно *вообразить* мир, не содержащий квазитвердых предметов, конечно, тогда такого рода измерения почти не имели бы смысла. В том же мире, где мы реально живем, достаточно широко распространены эти квазитвердые предметы, поэтому такие измерения приобретают большую важность.

При измерении времени мы сталкиваемся с очень похожей ситуацией. Чтобы такое измерение имело привычный для нас смысл, необходимо, чтобы разные приборы и методы могли давать совпадающие результаты, если их применять к одной и той же совокупности событий. Пусть, например, у двух людей есть хорошие часы, и эти люди договорились о встрече. Если они будут следить за временем по своим часам, они *на самом деле* смогут встретиться, т. е. прийти на условленное место так, чтобы не заставить друг друга ждать. Подобным же образом, зная, на который час назначено отправление поезда, и следя за временем по своим часам, вы, вообще говоря, на самом деле попадете на этот поезд. В другом случае, учитывая объективные возможности, можно запланировать количество работы, которое необходимо сделать до захода солнца, и, распланировав

по часам отдельные операции, действительно закончить все до наступления темноты. Едва ли стоит подчеркивать важность всеобщего измерения времени для упорядочения и организации нашей жизни как в общественном плане, так и в смысле ее связи с явлениями природы.

Регулярность и порядок, существующие в свойствах пространства, можно отразить в понятии *системы отсчета*. По существу — это упорядоченная координатная сетка, выбранная таким образом, чтобы сделать возможным выражение результатов разных измерений на одном общем языке и облегчить таким образом установление взаимосвязей между этими измерениями. Можно, например, представить себе систему параллельных равноотстоящих друг от друга линий с интервалом, скажем, в 1 см. Три такие системы линий как раз требуются для описания трехмерного пространства. Обычно их берут перпендикулярными друг другу, хотя иногда применяются и неортогональные системы линий. Тогда положение точки  $P$  определяется заданием трех *координат*  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , по существу указывающих число единичных шагов, которые следует проделать по каждой из трех систем линий, чтобы достигнуть этой точки, исходя из некоторого начала  $O$  (само начало выбирается произвольно по некоторому соглашению). Если бы нам потребовалось более точное определение положения точки  $P$ , то в принципе мы всегда могли бы разбить нашу сетку на новые достаточно мелкие интервалы.

Стоит подчеркнуть, что в пространстве действительно не существует этих координат, что они являются не более чем воображаемым построением, абстракцией, которую мы вводим из соображений удобства. Тем не менее они обладают определенным объективным содержанием, так как любое число независимых наблюдателей, пользующихся разными методами измерений, найдут одни и те же значения этих координат. Возможность такого согласия — *факт* исключительной важности, выдержавший бесчисленное множество проверок многими поколениями людей. (Заметим, что в том мире, где не было бы квазитвердых предметов, проводимые нами измерения

не находились бы в столь постоянном согласии друг с другом.)

Существует, конечно, некоторый произвол в выборе системы координат: например, один наблюдатель может взять ортогональную, а другой — неортогональную системы. Если даже они оба выберут ортогональные системы, то может оказаться, что *различны начала или ориентации осей* этих систем. Важно, однако, что разные системы координат связаны друг с другом соответствующими преобразованиями, что позволяет найти координаты любой точки в одной системе координат, если известны координаты *той же точки* в другой системе. Например, пусть координаты точки  $P$  в системе  $A$  равны  $x_0, y_0, z_0$ . В системе  $B$ , координатные оси которой параллельны осям системы  $A$ , а начало сдвинуто на вектор с компонентами  $a, b, c$ , координаты *той же точки*  $P$  будут равны

$$\begin{aligned}x &= x_0 - a, \\y &= y_0 - b, \\z &= z_0 - c.\end{aligned}\tag{11.1}$$

Если бы наши две системы координат имели общее начало, но система  $B$  была бы повернута относительно системы  $A$  на угол  $\theta$  вокруг оси  $z$ , то координаты одной и той же точки  $P$  в этих двух системах были бы связаны уравнениями

$$\begin{aligned}x &= x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta, \\y &= y_0 \cos \theta - x_0 \sin \theta, \\z &= z_0.\end{aligned}\tag{11.2}$$

В обоих случаях легко проверить, что расстояние между любыми двумя точками  $P$  и  $Q$  является *инвариантной величиной*, т. е. одинаково зависит от своих аргументов в любой системе координат, получаемой при таких преобразованиях (сдвиге и повороте). Мы просто упоминаем об этом факте, а не приводим доказательства, которые по существу основываются на теореме Пифагора.

Пусть  $x_1, y_1, z_1$  и  $x_2, y_2, z_2$  — соответственно координаты точек  $P$  и  $Q$  в системе  $B$ , а  $x'_1, y'_1, z'_1$  и  $x'_2, y'_2, z'_2$  — координаты этих точек в системе  $A$ ; тогда

$$\begin{aligned} (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 = \\ = (x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2 + (z'_1 - z'_2)^2 = \text{const} = \text{Инвариант}. \end{aligned} \quad (11.3)$$

Можно, конечно, найти и преобразования, связывающие ортогональные и неортогональные системы координат, но в неортогональных системах уравнение (11.3) уже не приводит к инвариантной величине. Существуют, однако, более общие инвариантные конструкции, применимые как к ортогональным, так и к неортогональным системам. Они играют важную роль в *общей* теории относительности Эйнштейна. В специальной же теории относительности, которая является предметом нашего изучения, достаточно ограничиться рассмотрением одних только ортогональных систем координат, так что в дальнейшем мы уже не будем обращаться к неортогональным системам пространственных координат.

Существует также *система отсчета времени*. Однако пока мы говорим о механике Ньютона, эта система остается много проще пространственной системы. Пользуясь часами, конечно, можно разделить время на равные отрезки, которые в принципе могут быть сделаны столь малыми, сколь это требуется в каждой конкретной задаче. Число этих отрезков между данным событием и произвольно выбранным началом равно (в должным образом подобранной шкале) временной координате этого события. Однако полагают, что для времени существует фактически лишь одна система «координат» (если отвлечься от возможности изменять масштаб измерения времени или переносить начало его отсчета в любой момент по своему выбору). Отсюда следует, что, задав какое-либо событие с временной координатой  $t$ , измеренной верными часами, мы будем иметь также потенциально существующее бесконечное множество событий, сосуществующих во времени с этим первым. В результате, если наблюдатель правильно организует свой процесс измерения времени, он непременно найдет, что

все эти события строго одновременны — ни одно не опережает первое событие и ни одно не отстает от него. Если это так, то имеет смысл приписать всем этим событиям одно и то же значение временной координаты  $t$  и сказать, что все они *одновременны*.

Конечно, указанное предположение было проверено бесчисленным множеством наблюдений как в обыденной жизни, так и в научном эксперименте. Поэтому люди, находящиеся в разных местах, могут говорить об одновременности совершаемых ими дел, хотя каждый измеряет время по своим часам. В случае, когда люди находятся в разных местах, но в пределах прямой видимости, они могут наблюдать, как каждый из них выполняет запланированные действия. Кроме того, они могут воспользоваться радио- или другими сигналами, чтобы передавать друг другу информацию. Например, два человека, находящиеся на противоположных концах земного диаметра, могут условиться заказать телефонный разговор на определенное время (например, по Гринвичу), и действительно, когда один из них подойдет к телефону, на другом конце провода его будет ждать другой.

Этот жизненный и научный опыт, конечно, зависит от того обстоятельства, что скорость света и радиоволн настолько велика, что в обычных масштабах времени и пространства можно пренебречь тем временем, за которое сигнал доходит из одного места в другое. Это все равно, что принять скорость света равной бесконечности. Если же учесть, что скорость света конечна, то возникают новые проблемы, и мы обратимся к ним в дальнейшем. Ограничиваясь пока понятиями дорелятивистской физики, поставим перед собой цель выяснить подоплеку тех идей, которые в ней заложены; это позволит яснее понять те представления о пространстве и времени, которые сложились к концу девятнадцатого столетия.

---

«Здравый смысл» и понятия  
пространства и времени

В предыдущей главе мы увидели, что в физике сложились определенные представления о пространстве и времени. Эти представления были основаны на громадном объеме повседневного опыта, на наблюдениях и экспериментах многих поколений людей. Они привели к идее пространственно-временной системы отсчета с подходящим образом выбранными координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и  $t$ . Эти координаты оказалось возможным привести во взаимно однозначное соответствие с чрезвычайно широким кругом реальных событий и предметов, если и те и другие наблюдались и измерялись разнообразными способами любыми квалифицированными исследователями. При этом, воспользовавшись координатами, связанными с системами отсчета, можно узнать много *деталей* о самих понятиях пространства и времени, применяемых в физике. Однако на самом деле эти детали оказываются вытекающими из необозримого множества наблюдаемых *взаимосвязей* между разнообразнейшими явлениями и различными типами измерительных приборов, причем все это множество взаимосвязей может быть упорядочено, систематизировано и объединено в такую структуру, которая поддается точному описанию на языке вышеупомянутых систем отсчета.

Если вся суть понятий пространства и времени сводится к наблюдаемым взаимосвязям типа описанных выше, то из чего же исходил Ньютон, постулируя абсолютность пространства и времени, которые он рассматривал как существующую саму по себе субстанцию, в основном не зависящую от всех этих взаимосвязей?



Он, очевидно, прежде всего исходил не из опыта и наблюдений, а скорее всего, как предполагалось в гл. 2, продолжил в модифицированной форме некоторые аспекты прежних аристотелевских представлений о пространстве. Что же касается того, откуда почерпнул свои взгляды Аристотель, то за ответом ходить недалеко. Ведь Аристотель лишь в систематической, последовательной, но оторванной от реальности форме выразил ту систему представлений, которая в основном была, вероятно, общепринятой еще за много веков до расцвета древней Греции и по сию пору остается взглядом «здорового смысла» на пространство. С этой точки зрения пространство рассматривается как род вместилница, внутри которого каждая вещь имеет свое место, размеры и формы. При этом пространство фактически «овеществляется» и ему приписывается абсолютность.

Эти вопросы мы рассмотрим подробнее в приложении, где станет ясно, что сформулированное выше понятие пространства создается и усваивается каждым еще в первые годы его жизни. После этого все привыкают пользоваться таким понятием, и эта привычка подкрепляется нормами нашего языка, в результате чего трудно даже подумать или высказать мысль, которая противоречила бы этому понятию или отрицала его. Такой процесс, по-видимому, почти неизбежен, и мы никому не предлагаем исключить из своего каждодневного обихода те представления о пространстве, которые диктует нам «здоровый смысл». Положение, однако, осложняется тем, что этот процесс усвоения представлений о пространстве и подкрепления их нашими привычками и нормами языка мы обычно не осознаем. В результате мы склонны воспринимать эти представления как необходимые и неизбежные, как будто они вообще не могут быть другими. Затем ученые включают эти идеи в свои теории, а уж теории, конечно, дают «научное подтверждение» неизбежности этих представлений! Но дело в том, что эти представления — результат долгого процесса, который фактически заставляет нас верить в их неизбежность *во всех возможных* ситуациях, во всех состояниях всего сущего, а не только использовать их в качестве предварительной и потому необязательной гипотезы, когда мы

вступаем в новую область познания. Именно такого рода приведение в надлежащее состояние (кондиционирование) ответственно за одну из, вероятно, принципиальнейших проблем современной физики в этих новых областях познания — теории относительности и квантовой теории, — а именно оно ответственно за трудность восприятия новых представлений, вступающих в противоречие со старыми, к которым мы привыкли с самого детства до такой степени, что нам кажется нелепым любой выход за их рамки.

Что касается понятия времени, то здесь вопросы кондиционирования, вероятно, играют еще более серьезную роль, чем в случае понятия пространства. На самом деле, точно так же, как мы привыкли представлять себе пространство абсолютным, в котором, как мы полагаем, вещи имеют реальные положения, размеры и форму, мы с самых детских лет привыкли схематизировать течение процессов — как в природе, так и в нашем «внутреннем» психологическом мире — и упорядочивать их в единственной и абсолютной временной последовательности. Основы такого упорядочивания очевидны. В любой момент мы видим все наше окружение — то, что сопутствует нашим восприятиям, как оптическим, так слуховым, осязательным и пр. Мы называем словом «теперь» тот момент, когда мы получаем всю эту совокупность восприятий. Скорость света настолько велика, что можно, конечно, пренебречь тем временем, за которое свет доходит до нас, по крайней мере если речь идет о предметах в нашем непосредственном окружении. Во многих случаях можно пренебречь и временем, за которое доходит до нас звук.

Мы нашли, что в определенных конечных границах событиям действительно можно приписывать единый всеобщий строго определенный порядок во времени, что видно из сделанного выше анализа. В этих границах всевозможные наблюдатели, пользуясь разными методами и приборами (с точностью до экспериментальных погрешностей), придут к общему выводу о том, какие события происходят сейчас, какие произошли раньше и какие произойдут позже. Иначе говоря, существуют твердые фактические основания для установления *хроноло-*

гического порядка — единых прошлого, настоящего и будущего для всех возможных событий, где бы они ни происходили и каким бы путем ни наблюдались.

Как и в случае понятия пространства, наше общежитское понятие времени, очевидно, не может быть *полностью ложным*. В противном случае не нашлось бы никого, кто бы пытался сохранить это понятие. Трудность состоит в том, что оно справедливо в ограниченной области и становится неприменимым, как только мы переступаем эти границы. Нам очень трудно, однако, порвать с привычкой рассматривать обыденные представления о времени как неизбежные — ведь область их применимости содержит такой громадный объем повседневного опыта, начинающего поступать к нам еще в детстве, и к тому же этот опыт включается в нормы нашего языка. В самом деле, чувство такой неизбежности заходит настолько далеко, что мы воспринимаем весь мир лишь через понятие времени. В результате нам кажется совершенно невозможным представить себе, чтобы все происходило иначе, чем в едином и абсолютном временном порядке, одинаковом для всего мира. И тем не менее, как мы сейчас увидим, теория относительности требует отказа от этого привычного порядка вещей. Сначала нам придется сделать это абстрактно и умозрительно, хотя бы даже это противоречило представлениям «здравого смысла». Возможно, позднее, привыкнув к этим идеям, мы начнем их чувствовать более «интуитивно».

Подведем итоги. Понятия абсолютных пространства и времени представляют собой лишь продолжение определенных уровней восприятия, познания, экспериментирования и пр., сформировавшихся в рамках обыденной жизни. Эти понятия нам теперь привычны, но мы когда-то, будучи детьми, должны были их усвоить. Эти привычки целесообразны в соответствующей им области, но не существует каких-либо твердо установленных фактов, которые указывали бы на неизбежность этих представлений. В самом деле, как мы видели, в физике пространственные и временная координаты рассматриваются лишь в составе *взаимосвязей* между наблюдаемыми явлениями и приборами, где невозможно усмотреть абсолютных пространства и времени. Подобным же образом,

как будет показано в приложении, факты, касающиеся роли восприятия в приобретении повседневного опыта, свидетельствуют также о полном господстве там взаимосвязей, так что и в этом случае на самом деле нет абсолютных пространства и времени. Следовательно, *как в области физики, так и в области повседневного опыта* может оказаться необходимым отбросить представления об абсолютных пространстве и времени для того, чтобы понять смысл новых открытий вне границ прежнего опыта.

---

*Введение  
в эйнштейновские представления  
о пространстве и времени*

Как только мы переходим к областям, в которых нельзя пренебрегать временем, необходимым свету для распространения между различными точками, обыденные представления о пространстве и времени начинают сталкиваться с трудностями, разрешить которые невозможно в рамках этих ограниченных представлений. При рассмотрении теории Лоренца мы уже видели, например, что если разнести одинаковые часы, первоначально шедшие синхронно, на расстояние  $l_0$ , то их показания станут различаться на величину

$$\frac{l_0 v}{c^2 \sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где  $v$  — скорость часов относительно гипотетического эфира. Но так как измерить эту скорость невозможно, мы никогда не сможем точно *узнать*, на сколько отклоняются в действительности от «истинного» синхронизма часы, показывающие в разных местах одно и то же время. В обыденной жизни такие отклонения, конечно, столь малы, что ими можно пренебречь, но если обратиться к прецизионным измерениям, их роль станет решающей.

Неопределенность понятия одновременности станет заметной даже на уровне простого опыта, если рассматривать очень большие расстояния. Возьмем, например, проблему теле- и радиосвязи, которая возникнет при достижении космонавтами Марса. Пусть некто на Земле спрашивает своего друга на Марсе, что у него происходит «в данный момент». Так как сигналам требуется время на то, чтобы пройти от Земли до Марса и об-

ратно, ответ придет не раньше, чем через 10 минут. Поэтому к моменту поступления ответа содержащаяся в нем информация будет относиться не к тому, что происходит «теперь», а к тому, что *происходило*, когда сигнал отправлялся с Марса. Значит, мы не сможем узнать, что происходит на Марсе «сейчас».

Возможно, вы захотели бы узнать, в какое время *произошло* по крайней мере данное событие. Для этого можно было бы посмотреть на часы космонавта, видимые на экране телевизора и совпадающие по своей конструкции с часами в вашей лаборатории. Пусть эти часы устроены так, что продолжают показывать верное время при ускорении в космическом корабле. Согласно теории Лоренца, показания их будут, однако, иными, чем показания часов на Земле, т. е. они рассинхронизируются по сравнению с земными часами на величину

$$\frac{l_0 v}{c^2 \sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где  $l_0$  — расстояние до Марса, а  $v$  — скорость часов относительно эфира. Ввиду того что скорость  $v$  неизвестна, для нас будет неопределенным и «истинное» время свершения данного события на Марсе.

Мы все же могли бы попробовать ввести поправку на время свершения события на Марсе, основываясь не на телевизионном изображении часов в космическом корабле, а на непосредственном учете того промежутка времени, который требуется свету, чтобы дойти от Марса до нас. Но чтобы эта поправка была правильной, необходимо, согласно теории Лоренца, знать «истинное» расстояние  $l$  от Земли до Марса, равно как и «истинную» скорость  $v$  движения Земли *относительно* эфира. Тогда поправка будет равна

$$\Delta t = \frac{l}{c - v}.$$

Таким образом, мы снова сталкиваемся по существу с той же неопределенностью, что и прежде, пытаюсь выяснить точное время свершения событий на Марсе.

Теперь ясно, что наши обыденные представления об одновременности становятся все более неопределенными

по мере выхода за рамки тех областей, в которых они возникли. Как было показано в гл. 11, эти представления исходили из интуитивного убеждения, что все сосуществующее в данный момент, который мы воспринимаем нашими чувствами, действительно происходит в этот самый момент, «теперь». Но стоит лишь нам перейти к удаленным от нас событиям, происходящим, например, на Марсе, мы видим, что даже при использовании самых быстрых, доступных нам средств связи (радиоволн или световых сигналов) изучаемые события совершаются *не* в момент их наблюдения, например на экране телевизора. При этом чем дальше от нас совершается событие, тем раньше оно произошло. Хорошо известно, что свет, улавливаемый нашими телескопами, был испущен звездами тысячи миллионов лет назад. Поэтому, когда мы имеем в виду большие расстояния, сосуществование событий в наших чувственных восприятиях уже совсем не означает одновременности. Также и в случае коротких расстояний при использовании прецизионных измерений мы приходим в основном к тем же выводам: если все события отмечены нашим прибором как сосуществующие (например, присутствуют на одном и том же фотоснимке), то еще нельзя говорить об их одновременности.

Еще серьезнее, чем эта неэквивалентность сосуществования и одновременности, описанная выше, тот факт, что не имеется, как мы уже видели, однозначного способа отнесения любого данного события к соответствующему строго определенному моменту в прошлом. Отсюда следует, что все наши интуитивные представления о настоящем, равно как о прошлом и о будущем, уже не стоят в простой связи с тем, что мы реально наблюдаем, воспринимаем, исследуем и измеряем.

Итак, при попытке применить интуитивное представление о времени вне рамок тех областей, где оно собственно возникло, мы наткнулись на глубокую и принципиальную неоднозначность. Поэтому, как уже отмечалось, необходимо полностью пересмотреть наш образ мыслей и заново перестроить понятия. Вместо того, чтобы опираться на воображаемое понятие одновременности, установление которой требует знания того, что мы

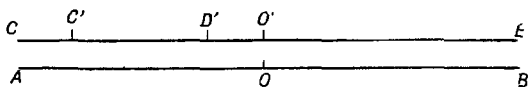
не можем вообще узнать (нашей скорости движения относительно принципиально ненаблюдаемого эфира), начнем наш анализ по возможности с действительных фактов и поддающихся проверке гипотез. О каких фактах идет речь? Мы уже коснулись одной стороны этих фактов в гл. 10, отметив, что все наши реальные знания о пространственных и временной координатах действительных событий, по крайней мере в принципе, покоятся на наблюдаемых *взаимосвязях* между физическими явлениями и соответствующими измерительными приборами. Чтобы избежать неопределенности в наших основных представлениях о пространстве и времени, необходимо выразить содержание физических законов исключительно на языке таких взаимосвязей, а не в терминах эфира, обладающего принципиально не поддающимися исследованию свойствами.

Теперь мы подготовлены к анализу того, что в основном составляло исходный пункт рассуждений Эйнштейна. Он принял, что все равномерно движущиеся (неускоренные) наблюдатели, пользуясь реально измеряемыми координатами наподобие описанных выше, обнаружат одну и ту же величину скорости света независимо от своих собственных скоростей. При этом они должны пользоваться приборами одинаковой конструкции и придерживаться эквивалентных методов измерения относительно своей собственной лабораторной системы отсчета. (*Специальная теория относительности ограничивается рассмотрением взаимосвязей, имеющих место среди равномерно движущихся наблюдателей; чтобы перейти к ускоренно движущимся наблюдателям, следует обратиться к общей теории относительности, которая выходит за рамки нашего рассмотрения.*)

Эйнштейн рассматривал этот вывод не как следствие из теории Лоренца, а как *основное предположение* (гипотезу), с очевидностью поддающееся опытной проверке и уже на самом деле подтвержденное в ряде экспериментов к тому времени, когда Эйнштейн приступил к построению своей теории. С тех пор оно получило новые подтверждения во многих разнообразных опытах, причем ни один опыт не вступил с ним в противоречие.



Чтобы яснее понять, к каким последствиям приводит эта гипотеза в отношении физического понятия одновременности, Эйнштейн рассмотрел простой пример. Это — *мысленный* эксперимент в том смысле, что у нас, по крайней мере в настоящее время, нет приборов, чувствительность которых позволила бы осуществить его. *В принципе*, однако, этот эксперимент возможен, и преимущество его состоит в том, что он полностью раскрывает природу тех трудностей, к которым приводят старые представления при анализе одновременности двух удаленных событий.



Фиг. 8.

Рассмотрим поезд, движущийся по железнодорожной насыпи со скоростью  $v$ . Поместим в точку  $O$  у насыпи неподвижного наблюдателя, более или менее близкого к середине поезда. Другие два наблюдателя, обладающие хорошо синхронизованными часами, пусть располагаются в точках  $A$  и  $B$  (фиг. 8). Пусть  $A$  и  $B$  находятся на одном и том же расстоянии  $l$  от  $O$ , если проводить измерение линейками, покоящимися относительно насыпи. Пусть наблюдатели в точках  $A$  и  $B$  посылают световые вспышки, а наблюдатель в точке  $O$  принимает эти вспышки в один и тот же момент. Из факта одновременности прихода сигналов он с необходимостью заключает, что они были отправлены также одновременно. Момент посылки сигналов наблюдатель  $O$  определяет по времени, за которое свет доходит до него от  $A$  и  $B$ . Ввиду равенства этих двух расстояний и так как скорость света в обоих направлениях одинакова, из вычислений наблюдателя  $O$  следует, что вспышки произошли в один и тот же момент.

Поместим теперь на движущемся поезде наблюдателя  $O'$ . Допустим, что  $O'$  поровнялся с наблюдателем  $O$ , когда  $O$  принимал сигналы от  $A$  и  $B$ . Конечно, наблюдатель  $O'$  также одновременно увидит эти две

вспышки. Но и ему нужно вычислить, в какое время они были отправлены. Для этого с помощью своих линеек, движущихся вместе с поездом, он должен измерить расстояния до источников света. Ему будет удобнее сделать это, пользуясь услугами нескольких помощников, размещенных в разных частях поезда.

Пусть один из этих помощников оказался в точке  $A$ , когда оттуда был послан сигнал. Обозначим положение этого помощника на поезде точкой  $C$ . При своих измерениях этот первый помощник, отмечая положение точки  $A$  в момент посылки из нее сигнала, фиксирует на своей линейке положение точки  $C$ , мимо которой в этот момент проходит точка  $A$ . Затем световой сигнал распространяется от  $C$  до  $O'$ , или, что то же, от  $A$  до  $O$ ; на это он затрачивает некоторое время. Рассуждая об этом процессе с точки зрения наблюдателя на насыпи, мы видим, что в момент посылки сигнала главный наблюдатель на поезде, который позднее поровняется с точкой  $O$ , еще не мог достигнуть точки  $O'$ , а находился лишь в  $D'$ , левее  $O'$ , так что он в дальнейшем покроет расстояние  $D'O'$ , пока свет будет распространяться от  $A$  до  $O$ , или, что то же, от  $C$  до  $O'$ . В момент, когда наблюдатель на поезде попадает в  $O'$  и видит сигнал, точка  $C$  уже пройдет, согласно данным наблюдателя на насыпи, до точки  $C'$ , покрыв расстояние, равное  $D'O'$ . Так как наблюдатель на поезде  $O'$  рассматривает себя как покоящегося, он не должен при определении расстояния до источника световой вспышки принимать во внимание собственное движение. Поэтому найденное им расстояние  $C'O'$  меньше, чем расстояние  $AO$ , полученное наблюдателем на насыпи. Подобным же образом он найдет, что путь  $EO'$ , который свет проходит от  $E$  до  $O'$ , длиннее аналогичного пути  $BO$ , измеренного наблюдателем на насыпи.

Если бы при этом была справедлива механика Ньютона, то различия в измерении расстояния нашими двумя наблюдателями должны были «компенсироваться». Дело в том, что для наблюдателя на поезде скорость светового сигнала, идущего от  $C$ , была бы тогда занижена и равна  $c - v$ , а скорость сигнала от  $E$  — повышена и равна  $c + v$ . В результате он подсчитал бы, что

сигналы из  $S$  и  $E$  были отправлены в один и тот же момент в согласии с выводами наблюдателя на насыпи, чего и требует «здравый смысл».

На самом же деле скорость света должна быть одной и той же для всех наблюдателей, ибо, как мы уже видели, таков результат всех экспериментов. Поэтому наблюдатель на поезде будет отрицать одновременность посылки сигналов, так как свет, обладая одной и той же скоростью, должен был покрыть разные расстояния.

Здесь мы вступаем в резкое противоречие с прежними взглядами, так как разные наблюдатели уже не согласны друг с другом относительно одновременности удаленных друг от друга событий. Все же следует подчеркнуть, что установление одновременности удаленных событий опирается лишь на *косвенные рассуждения*, на результаты вычислений, дающих поправку на время, необходимое световому или радиосигналу для преодоления пути от точки посылки сигнала до места его приема. Таким образом, одновременность перестала быть *непосредственным фактом*, соответствующим восприятию явлений в один и тот же момент времени. Теперь мы видим, что она в значительной мере зависит от чисто *практических способов* учета времени распространения сигналов. Эта методика сама по себе представляется естественной и неизбежной с точки зрения «здравого смысла», но она дает однозначные результаты, совпадающие для всех наблюдателей лишь в тех условиях, когда галилеев закон сложения скоростей является хорошим приближением. Если же скорость света нельзя считать практически бесконечно большой, то ясно, что результаты, полученные экспериментальным путем, должны будут зависеть от скорости движения аппаратуры наблюдателя.

Из проведенного обсуждения явствует, что одновременность — *не абсолютная* характеристика явлений, которая не зависит от состояния движения измерительных приборов. Одновременность следует рассматривать лишь *относительно* наблюдателя в том смысле, что разные наблюдатели, производя одинаковые наблюдения с помощью одинаково построенных приборов, но движущиеся с различными скоростями, обнаружат разные совокупности одновременных событий.

Если бы была возможность передавать из точки в точку сигналы мгновенно, то не потребовалось бы вводить поправок на время их распространения, и мы не пришли бы к описанной выше относительности одновременности. Но мы не знаем сигнала, который распространялся бы быстрее света. Более того, как увидим в дальнейшем, теория относительности утверждает, что *подобных сигналов вообще не может быть*. Само предположение о возможности такого сигнала приводит к противоречию с теорией относительности. Значит, по крайней мере насколько нам известно и поскольку мы говорим о существующих физических теориях, при вычислении времени удаленных событий всегда необходимо вводить стандартным образом поправку на время, необходимое световым сигналам для распространения между удаленными точками, учитывая также тот факт, что все наблюдатели получают в результате измерения одну и ту же величину скорости света. При этих условиях относительность одновременности следует с неизбежной необходимостью. Достаточно согласиться с тем, что одновременность существует лишь относительно наблюдателя (в указанном выше смысле), и мы должны будем также признать, что относительны и измерения длин и интервалов времени. Чтобы доказать это утверждение для случая длины, возвратимся к истории с двумя наблюдателями, один из которых неподвижен относительно железнодорожной насыпи, а другой движется вместе с поездом. Предположим, что наблюдатель на насыпи протянул измерительную рулетку от  $A$  до  $B$  и установил в  $A$  и  $B$  часы, синхронизованные с помощью световых сигналов по правилу

$$t' = t - \frac{l}{c}.$$

Наблюдатель на поезде действует точно так же в своей движущейся системе отсчета, протягивая свою рулетку и расставляя часы, синхронизованные световыми сигналами, но уже по правилам

$$t_0^A = t_0 - \frac{l_0^A}{c} \quad \text{и} \quad t_0^B = t_0 - \frac{l_0^B}{c},$$

где  $l_0^A$  и  $l_0^B$  — соответственно расстояния от  $O$  до  $A$  и от  $O$  до  $B$ , измеренные по рулетке, движущейся вместе с поездом.

Если линейка не движется относительно наблюдателя, тот может измерять ее длину независимо от измерения времени, т. е. может рассматривать один конец линейки  $A$  «сейчас», а другой конец  $B$  — «чуть позже», и результат от этого не изменится. Если же линейка движется мимо наблюдателя, то тому приходится определять ее длину как расстояние между концами линейки, взятыми *в один и тот же момент*. (Ведь если бы наблюдатель на насыпи определил положение «хвоста» поезда в один момент, а его «головы» — часом позже, он заявил бы, что длина поезда составляет 100 км или более того, — вывод явно нелепый.)

Допустим теперь, что помощники наблюдателя  $O$  в точках  $A$  и  $B$  отправляют сигналы в одно и то же время, измеренное по их часам (они неподвижны относительно насыпи), и это происходит как раз в тот момент, когда противоположные концы поезда проходят соответственно мимо  $A$  и  $B$ . Аналогично предположим, что движущиеся наблюдатели в точках  $A'$  и  $B'$  на концах поезда посылают сигналы, когда их часы показывают одно и то же время. Из нашего анализа понятия одновременности следует, что наблюдатели на насыпи заключат (на основании своих вычислений), что сигналы, одновременные для наблюдателей на поезде, посланы в разное время. Наоборот, наблюдатели на поезде посредством вычислений обнаружат, что сигналы, одновременные для наблюдателей на насыпи, посланы в разное время.

Предположим, что сигналы, одновременные для наблюдателей на поезде, с точки зрения наблюдателей на насыпи расходятся по времени на  $\delta t$ . За этот срок поезд проходит расстояние  $v\delta t$ . Отсюда наблюдатели на насыпи заключат, что их коллеги на поезде измеряют вовсе не «истинную» длину поезда, а добавляют к ней тот сдвиг, который происходит при движении поезда за время  $\delta t$ . Не удивительно поэтому, что их результаты будут другими. Аналогично и наблюдатели на поезде решат, что их коллеги на насыпи измеряют не «истинную» длину поезда, следовательно, и их не удивит различие

результатов наблюдений. Проанализировав выводы обеих групп наблюдателей, мы заметим, однако, нечто большее, а именно, что ввиду различия в определении этими наблюдателями одновременности появляется и различие в определении ими длины одного и того же предмета. Другими словами, хотя каждый наблюдатель в своей собственной системе отсчета продельывает одни и те же операции, пользуясь одинаково сконструированными приборами, разные группы наблюдателей фактически имеют в виду *разные совокупности событий*, когда говорят о длине одного и того же предмета.

Подобная же проблема возникает и при измерении отрезков времени. Чтобы это увидеть, мы вновь рассмотрим наш пример, в котором «голова» поезда проходит мимо точки  $A$ , а его «хвост» — мимо точки  $B$  в одно и то же время по часам, помещенным в этих точках и синхронизованным с часами в  $O$ . Это обстоятельство могут, например, фиксировать помощники наблюдателя  $O$ , находящиеся в точках  $A$  и  $B$ . Возьмем теперь часы на поезде, показывающие время  $t'_1$ , когда его «голова» проходит через точку  $A$ , и время  $t'_2$ , когда она проходит через  $B$ . Наблюдатель, находящийся на поезде, скажет тогда, что головному концу поезда потребовалось время

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1,$$

чтобы пройти от  $A$  до  $B$ . С другой стороны, наблюдатели на насыпи воспользуются для измерения этого времени своими часами, помещенными в точках  $A$  и  $B$  и синхронизованными соответствующим образом. Если через  $t_A$  обозначить время, когда наблюдатель в точке  $A$  отметил, что с ним поровнялась «голова» поезда, а через  $t_B$  — момент, в который другой наблюдатель на насыпи отметил прохождение «головы» поезда мимо  $B$ , то эти наблюдатели придут к выводу, что искомый отрезок времени равен  $\Delta t = t_B - t_A$ . Однако, как мы видели, для наблюдателей на поезде часы, находящиеся в точках  $A$  и  $B$ , идут *не синхронно*, и они скажут, что наблюдатели на насыпи в действительности измеряют не «истинное» время, которое затрачивает поезд, чтобы пройти от  $A$  до  $B$ . С теми же основаниями наблюдатели на насыпи скажут о своих коллегах на поезде, что те также не

по правилам измеряют «истинное» время. Но, как и при измерении длины, ясно, что использование движущихся часов приводит к необходимости учета относительности одновременности, и поэтому определение промежутков времени также должно носить *условный практический* характер. В результате отрезки времени не обладают абсолютным смыслом, а зависят от скорости движения тех приборов, которыми измеряется время.

Итак, мы увидели, что существует тесная взаимосвязь между определениями *одновременности, длины и промежутка времени*, а тот факт, что все наблюдатели при измерениях получают одно и то же значение скорости света, показывает, что все эти три понятия следует считать не абсолютными, а имеющими смысл лишь по отношению к конкретным системам отсчета.

---

*Эйнштейновский подход  
к преобразованиям Лоренца*

Описанный в предыдущей главе относительный характер пространственно-временных координат можно сравнить с подобным, уже знакомым нам характером чисто пространственных координат. В процессе измерения пространственных координат каждый наблюдатель может ориентировать свои приборы в любом направлении, так что разные наблюдатели получают для одной и той же точки неодинаковые значения координаты  $x$ . Это значит, что координата  $x$  — не «абсолютное» свойство точки, а лишь выражение *соотношения* между этой точкой и выбранной системой отсчета. Подобным же образом наблюдатели, движущиеся с разными скоростями, получают неодинаковые значения для «временной координаты» данного события, так что эта координата тоже должна соответствовать некоторой взаимосвязи события с системой отсчета и не может быть «абсолютным» свойством рассматриваемого события.

Когда мы говорили о геометрии пространства, то заметили, что, несмотря на «относительность» смысла координат, существуют некоторые преобразования, такие, например, как сдвиги (11.1) и повороты (11.2), позволяющие нам судить о том, что мы имеем дело с одной и той же точкой, даже когда измерения проводились в системах, оси которых были различным образом повернуты относительно друг друга, а начала сдвинуты. Существуют ли аналогичные преобразования для пространственных и временной координат, взятых вместе?

Как мы видели в гл. 2, в ньютоновской механике существуют преобразования Галилея (2.3), которые и



позволяют соотнести друг с другом пространственно-временные координаты одного и того же события, если их измерять в разных системах отсчета, движущихся относительно друг друга. Мы нашли, однако, что по закону сложения скоростей Галилея измеряемая величина скорости света должна зависеть от скорости движения аппаратуры наблюдателя. Так как это предсказание противоречит опытным фактам, то ясно, что преобразования Галилея не могут быть верны. (Они применимы разве что в качестве приближения, когда скорость света можно считать практически бесконечно большой.)

Наша цель состоит в получении преобразования между системой координат  $x, y, z, t$  некоторого события, измеренных в данной системе отсчета  $A$ , и другой системой координат  $x', y', z', t'$ , соответствующих тому же событию, но измеренных в другой системе отсчета  $B$ , которая движется относительно системы отсчета  $A$ . Чтобы упростить исследование, предположим, что скорость системы  $B$  относительно  $A$  равна  $v$  и направлена вдоль оси  $z$  (обобщение на случай произвольно направленной скорости будет совершенно очевидным).

Это преобразование должно соответствовать тому факту, что измеряемая величина скорости света во всех равномерно движущихся системах отсчета равна  $c$ . Чтобы выразить это утверждение в математической форме, выберем в качестве начала пространственно-временной системы координат  $O$  в обеих системах отсчета событие, соответствующее вспышке света. Тогда в системе  $A$  свет за время  $t$  должен распространиться до поверхности сферы, определяемой уравнением

$$c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0. \quad (14.1)$$

В системе отсчета  $B$  фронт световой волны будет также лежать на сферической поверхности

$$c^2 t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = 0. \quad (14.2)$$

Нам нужно найти преобразование, при котором уравнение фронта световой волны остается инвариантным, т. е. преобразование, переводящее уравнение (14.1) в (14.2).

В гл. 9 мы уже видели, что существует преобразование, оставляющее инвариантной величину скорости света; это — *преобразование Лоренца*. К нему, очевидно, можно присовокупить произвольный *пространственный поворот*, ибо он оставляет инвариантной функцию  $x^2 + y^2 + z^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2$ , а также время ( $t' = t$ ), поэтому величина  $c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$  остается также инвариантной. Кроме того, допустимы отражения пространственной и временной осей,  $x \rightarrow -x'$ ,  $t \rightarrow -t'$  и т. д., относительно которых скорость света, конечно, инвариантна.

Теперь естественно спросить, не существует ли каких-либо других преобразований, относительно которых скорость света инвариантна? Ответ: если исходить из физически разумного требования, чтобы наши преобразования не содержали особых точек (т. е. были бы повсюду регулярными и непрерывными), то можно показать, что единственно возможными являются преобразования Лоренца, дополненные сдвигами, поворотами и отражениями.

Следует подчеркнуть, что в эйнштейновской трактовке преобразования Лоренца выводятся не как следствие изменения измерительных приборов при их движении в гипотетическом эфире (именно в силу этого последнего обстоятельства все наблюдатели независимо от своих скоростей будут получать при измерении одну и ту же величину скорости света). Напротив, как уже было отмечено в предыдущих главах, здесь следует исходить из хорошо проверенной опытом гипотезы об инвариантности скорости света, которую мы *измеряем реально*. Это не требует никаких объяснений (например, со ссылкой на изменение приборов в воображаемом эфире), а само становится исходным пунктом для дальнейшего анализа (подобным же образом в ньютоновской механике исходят из законов Ньютона, приняв их в качестве строго проверенной гипотезы, а в электродинамике основываются на законах Фарадея и Ампера). Сделав такой выбор исходной гипотезы, Эйнштейн перешел к доказательству вышеописанным способом, что преобразования Лоренца являются единственными физически допустимыми и не противоречат этой гипотезе.

Запишем снова преобразование Лоренца [см. уравнения (9.1) — (9.3) и (9.5)], выражающее координаты системы  $B$  через координаты системы  $A$ :

$$\begin{aligned} z' &= \frac{z - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, & t' &= \frac{t - (vz/c^2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \\ x' &= x, & y' &= y. \end{aligned} \quad (14.3)$$

Обратное преобразование, выражающее координаты системы  $A$  через координаты системы  $B$ , имеет вид

$$\begin{aligned} z &= \frac{z' + vt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, & t &= \frac{t' + (vz'/c^2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \\ x &= x', & y &= y'. \end{aligned} \quad (14.4)$$

Заметим, что обратное преобразование получается из прямого заменой  $v$  на  $-v$ . Этого и следовало ожидать, так как если скорость системы  $B$  относительно системы  $A$  равна  $v$ , то скорость системы  $A$  относительно системы  $B$  равна  $-v$ . Поэтому мы в действительности пользуемся при переходе от  $B$  к  $A$  теми же функциями самой скорости (учитывая ее знак), что и при переходе от  $A$  к  $B$ .

Заметим также, что при  $v/c \rightarrow 0$  (что эквивалентно  $c \rightarrow \infty$ ) преобразование Лоренца сводится к преобразованию Галилея

$$\begin{aligned} z' &= z - vt, & t' &= t, \\ x' &= x, & y' &= y. \end{aligned} \quad (14.5)$$

Этот факт с определенностью указывает на то, что в эйнштейновских понятиях пространства и времени как предельный случай содержатся прежние пространственно-временные представления, применимые, пока отношение  $v/c$  не слишком велико.

Очевидно, что из преобразований Лоренца следует относительность одновременности, длины и промежутков времени, о чем говорилось в предыдущей главе. Например, если наблюдатель, покоящийся в системе  $B$  (назовем его наблюдателем  $B$ ), обнаруживает, что некоторая совокупность событий происходит в его системе отсчета одновременно, в момент  $t' = 0$ , то, как видно из уравнений (14.4), наблюдатель  $A$ , покоящийся в системе  $A$ ,

найдет для этих событий  $t = vz/c^2$ ; такие события, конечно, для него не являются одновременными. Точно так же, когда наблюдатель в системе  $A$  измеряет длину предмета, движущегося мимо него со скоростью  $v$  в направлении оси  $z$ , он должен отметить положения обоих концов этого предмета в один и тот же момент времени, измеренного в его системе отсчета, например при  $t=0$ . Из уравнений (14.3) тогда следует

$$z' = \frac{z}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

или же

$$z = z' \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}.$$

Так как  $v$  — скорость этого предмета, ясно, что  $z'$  — его длина в системе отсчета, в которой этот предмет покоится. Полученные соотношения дают как раз величину известного лоренцева сокращения.

Чтобы разобраться в изменении хода часов, мы будем исходить из системы отсчета  $B$ , относительно которой эти часы покоятся, скажем, в точке  $z'=0$ . Примем их период равным  $t'$ . Из уравнений (14.4) получим

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

— это то самое соотношение, которое выражает эффект замедления хода движущихся часов.

Полученные только что выводы касаются того, как соотносятся показания приборов наблюдателя  $B$  и соответствующие им показания приборов наблюдателя  $A$ . Вспомним, что переход от системы  $B$  к системе  $A$  имеет тот же вид, что и переход от системы  $A$  к системе  $B$ , только  $v$  заменяется на  $-v$ . Из этого замечания следует, что точно таким же образом должны соотноситься показания приборов наблюдателя  $A$  и соответствующие им показания приборов наблюдателя  $B$ . Это значит, например, что наблюдатель  $A$  видит линейки у наблюдателя  $B$  сократившимися в длине, в то время как наблюдатель  $B$  видит линейки у наблюдателя  $A$  также сократившимися в длине.

Как могло оказаться, что каждый из наблюдателей в одно и то же время обнаруживает аналогичное сокращение линеек своего коллеги? Иначе говоря, почему, если наблюдатель  $A$  утверждает, что линейки у  $B$  короче, чем у него, наблюдатель  $B$  не видит, что линейки у  $A$  длиннее его линеек? Разгадка в том, что, как мы уже видели, измеряя длину какого-либо предмета, наблюдатели  $A$  и  $B$  имеют в виду *разные системы событий*. Оценивая по-разному одновременность,  $A$  считает, что  $B$  допускает сдвиг линейки в процессе измерения и то, что он меряет, не совпадает с действительной длиной. В точности то же самое скажет и  $B$  об  $A$ .

Хотелось бы сравнить эту ситуацию с тем, что происходит, когда два человека  $A$  и  $B$  удаляются друг от друга, продолжая видеть один другого. Тогда  $A$  скажет, что  $B$  становится все меньше, а  $B$  скажет, что  $A$  становится все меньше. Почему же  $B$  не говорит, что  $A$  становится больше? Ответ в том, что *каждый видит нечто свое*, а именно изображение мира на сетчатке *своего* глаза. Нет никакого парадокса в том, что изображение человека  $A$  на сетчатке у  $B$  становится все меньше соответственно тому, как уменьшается изображение  $B$  на сетчатке у  $A$ . Точно так же нет парадокса и в том, что наблюдатель  $A$  отмечает сокращение линейки наблюдателя  $B$  и вместе с тем  $B$  отмечает такое же сокращение линейки у  $A$ . Каждый из них просто имеет в виду *нечто свое*, когда говорит о длине одного и того же предмета.

---

### Сложение скоростей

Раньше мы записывали преобразование Галилея между координатами  $x', y', z', t'$  в системе  $B$ , движущейся со скоростью  $v$  в направлении оси  $z$ , и координатами  $x, y, z, t$  в покоящейся системе  $A$  в виде

$$z' = z - vt, \quad x' = x, \quad y' = y, \quad t' = t. \quad (15.1)$$

Наблюдая движение какого-либо предмета, имеющего скорость  $u$  в направлении оси  $z$ , наблюдатель в системе отсчета  $A$  скажет, что движение этого предмета описывается уравнением

$$z = ut + z_0.$$

Примем для простоты  $z_0 = 0$ . Тогда получим

$$u = \frac{z}{t}.$$

Чтобы узнать, что видит наблюдатель в системе отсчета  $B$ , применим преобразование Галилея и найдем

$$z' = z - vt = (u - v)t = (u - v)t'. \quad (15.2)$$

Следовательно, наблюдатель в системе  $B$  припишет движущемуся предмету скорость

$$w = \frac{z'}{t'} = u - v. \quad (15.3)$$

Конечно, это и есть известный закон сложения скоростей Галилея [см. уравнение (2.3)], который мы теперь вывели более последовательно, чтобы облегчить сравнение с результатами теории Эйнштейна.

Если переход между системами отсчета  $A$  и  $B$  описывается не преобразованием Галилея, а преобразованием Лоренца, то нужно исходить из уравнений (14.3), выражающих координаты системы  $B$  через координаты системы  $A$ , а именно

$$z' = \frac{z - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (15.4)$$

В системе отсчета  $A$  движение рассматриваемого предмета снова выражается уравнением  $z = ut$ , как и в том случае, когда мы применяли преобразование Галилея. Поэтому

$$z' = \frac{(u - v)t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (15.5)$$

Кроме того, из уравнений (14.3) следует

$$t' = \frac{t - \frac{vz}{c^2}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{t \left(1 - \frac{uv}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (15.6)$$

так что

$$w = \frac{z'}{t'} = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}. \quad (15.7)$$

Это и есть релятивистский закон сложения скоростей. Заметим, что при стремлении отношения  $v/c$  к нулю выражение (15.7) стремится к закону Галилея

$$w = u - v.$$

Однако в более общем случае полученный закон, очевидно, в корне отличается от закона Галилея. Например, как легко видеть, складывая скорости, меньшие скорости  $c$ , никогда нельзя превзойти скорость  $c$ . Чтобы доказать это утверждение, возьмем преобразование не от системы  $A$  к  $B$ , а от системы  $B$  к  $A$ . Из сравнения уравнений (14.3) и (14.4) видно, что это означает просто замену  $v$  на  $-v$ . Отсюда следует

$$W = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}. \quad (15.8)$$

Здесь суммарная скорость обозначена прописной буквой, чтобы читатель не смешивал эту формулу с формулой (15.7).

Отсюда видно, что если  $u$  и  $v$  положительны, то  $W < u + v$ , следовательно, взяв предмет, движущийся со скоростью  $u$ , и рассмотрев его движение в системе отсчета, обладающей скоростью  $-v$ , мы найдем, что скорость этого предмета не будет равна сумме этих двух скоростей, как казалось бы с точки зрения «здорового смысла». Когда отношение  $v/c$  стремится к единице, релятивистские эффекты становятся все более и более очевидными. Чтобы увидеть, к чему это приводит, исследуем величину

$$c^2 - W^2 = c^2 - \frac{(u+v)^2}{\left(1 + \frac{uv}{c^2}\right)^2} = c^2 \frac{[1 - (u/c)^2][1 - (v/c)^2]}{\left(1 + \frac{uv}{c^2}\right)^2}. \quad (15.9)$$

Пока  $u^2/c^2 < 1$  и  $v^2/c^2 < 1$ , разность  $c^2 - W^2$  положительна и  $|W| < c$ . Поэтому, складывая две скорости, меньшие  $c$ , невозможно получить скорость, равную скорости света. [Возьмем, например,  $u = 0,9c$  и  $v = 0,9c$ , тогда  $W/c = 1,8/(1 + 0,9 \cdot 0,9) = 1,8/1,81 < 1$ .] Взяв же  $u = c$ , получим

$$W = \frac{v + c}{1 + (v/c)} = c,$$

откуда видно, что скорость света будет иметь в новой системе отсчета ту же величину, что и в старой.

Проведенная дискуссия показывает, что скорость света является тем пределом, к которому могут лишь стремиться скорости материальных тел, но они не могут ни достигнуть, ни превзойти его. Возьмем, например, космический корабль. Пусть двигатель дает ему серию импульсов, каждый из которых *в системе отсчета, связанной с космическим кораблем*, приводит к изменению его скорости на величину  $\Delta v$ . Из релятивистского закона сложения скоростей следует, что сколько бы мы ни ускоряли таким образом наш корабль, он никогда не достигнет скорости света, хотя бы мы сожгли сколь угодно большое, но конечное количество горючего. (В одной из последующих глав мы снова придем к этому же выводу из других соображений, показав, что наш корабль не может достичь скорости света, так как величина его



массы при этом стремится к бесконечности и по мере приближения его скорости к скорости света ускорять его становится все труднее.)

Мы рассматривали до сих пор сложение лишь параллельных друг другу скоростей, так что задача сводилась к одномерному случаю. Однако наши выводы очень просто распространить на случай трех измерений. Возьмем для этого в системе отсчета  $A$  предмет, скорость которого имеет компоненты  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ , так что его движение описывается уравнениями

$$x = u_x t, \quad y = u_y t, \quad z = u_z t.$$

Рассмотрим преобразование Лоренца для скорости  $u$  (которую всегда можно ориентировать вдоль оси  $z$ , повернув соответствующим образом систему координат). Тогда мы получим

$$\begin{aligned} u'_z &= \frac{z'}{t'} = \frac{u_z - v}{1 - \frac{u_z v}{c^2}}, \\ u'_x &= \frac{x'}{t'} = \frac{u_x \sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{u_z v}{c^2}}, \\ u'_y &= \frac{y'}{t'} = \frac{u_y \sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{u_z v}{c^2}}. \end{aligned} \quad (15.10)$$

В векторной записи эти соотношения удобно представить в виде

$$\mathbf{u}' = \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{\mathbf{u}\mathbf{v}}{c^2}} (\mathbf{u} - \mathbf{v}_0 (\mathbf{u}\mathbf{v}_0)) + \frac{\mathbf{v}_0 (\mathbf{u}\mathbf{v}_0)}{1 - \frac{\mathbf{u}\mathbf{v}}{c^2}}, \quad (15.11)$$

где  $\mathbf{v}_0$  — единичный вектор в направлении скорости  $\mathbf{v}$ . Иногда бывает удобно представить в векторной записи сами преобразования Лоренца. Тогда получим

$$\begin{aligned} x' &= x - \mathbf{v}_0 (x\mathbf{v}_0) + \frac{\mathbf{v}_0 (x\mathbf{v}_0) - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \\ t' &= \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \end{aligned} \quad (15.12)$$

---

## Принцип относительности

Со времен Аристотеля и средневековых схоластов развитие физики шло в направлении большей «релятивизации», т. е. учета относительного характера явлений. Так, Коперник заложил основы для отказа от представления, что существуют особые места в пространстве и моменты во времени, имеющие абсолютное значение в том смысле, что они должны играть исключительную роль привилегированной системы отсчета при математическом выражении законов физики. Вместе с этим росло, конечно, понимание того, что в пространстве нет «абсолютного направления», т. е. что вид законов физики не меняется при повороте системы координат. Затем было обнаружено, что законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея, иначе говоря, уравнения Ньютона *сохраняют свой вид* независимо от скорости движения системы отсчета.

Такое развитие физики в направлении относительного описания явлений наталкивалось на трудности и приводило к возникновению новых проблем при исследовании свойств света и электромагнитных явлений. Так как скорость света конечна (равна  $c$ ), то из преобразований Галилея следовало, что величина этой скорости относительно наблюдателя зависит от выбора его системы отсчета. Подобным же образом при преобразованиях Галилея, очевидно, не имеют инвариантного вида и уравнения Максвелла для электромагнитного поля, описывающие распространение света и других видов электромагнитного излучения, а также их поляризационные свойства. Другими словами, должна была бы существовать

привилегированная система отсчета, в которой точно выполнялись бы уравнения Максвелла, а скорость света была бы равна  $c$  во всех направлениях. Поэтому физики XIX века постулировали существование эфира — понятие, роль которого фактически сводилась к созданию физической основы для такой привилегированной системы отсчета.

Когда же соответствующие опыты (типа опыта Майкельсона — Морли) не подтвердили предсказаний простой теории эфира о свойствах этой системы отсчета, Лоренц предложил новую теорию, объяснившую отрицательные результаты таких опытов как следствие изменений, происходящих в измерительных приборах при движении их относительно эфира. Однако его теория привела к той трудности, что вопрос о точных величинах «истинных» расстояний и промежутков времени, взятых в системе, покоящейся относительно эфира, оказался туманным, а сами величины не поддавались определению.

Сущность эйнштейновского подхода состояла в отказе от представлений об абсолютных пространстве и времени, на которых основана гипотеза эфира, и в принятии вместо этого относительного подхода к электромагнитным явлениям и распространению электромагнитного излучения. Заметим, что законы движения Ньютона выражались *одними и теми же соотношениями* во всех равномерно движущихся системах, связанных между собой преобразованиями Галилея, а закон инвариантности наблюдаемой величины скорости света выражался *одним и тем же соотношением* во всех равномерно движущихся системах, связанных между собой преобразованиями Лоренца. Кроме того, как показывает дальнейший анализ, уравнения Максвелла обладают подобной же инвариантностью относительно преобразований Лоренца в том смысле, что эти уравнения сохраняют свой вид во всех системах координат, связанных между собой указанными преобразованиями (этот вопрос мы будем еще обсуждать в гл. 21). Следовательно, в этой части своей концепции Эйнштейн просто подытожил очевидные факты, а именно, что электромагнитное излучение количественно исследуется путем установления со-

ответствующих соотношений между электромагнитными явлениями и приборами и что, как известно из опыта, законы электродинамики выражаются *инвариантными* соотношениями между наблюдаемыми таким образом величинами. Под этой *инвариантностью* соотношений, выражающих законы электродинамики (уравнения Максвелла), мы понимаем сохранение ими неизменной формы независимо от места и времени наблюдения электромагнитных явлений и от выбора начала, ориентации осей и скорости систем отсчета (последние связаны между собой сдвигами, поворотами и преобразованиями Лоренца).

Однако ясно, что так как законы Ньютона инвариантны относительно преобразований Галилея, то они не могут быть инвариантными относительно преобразований Лоренца. Чтобы доказать это утверждение, запишем уравнения Ньютона сначала в заданной системе отсчета  $B$ , движущейся со скоростью  $v$  относительно другой системы  $A$ :

$$m \frac{du'}{dt'} = F.$$

Возьмем частицу, движущуюся в направлении оси  $z$ , вдоль которой направлена и скорость  $v$ . Если системы  $B$  и  $A$  связаны между собой преобразованием Лоренца, то уравнение (15.7) даст

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}.$$

Кроме того, величина  $dt'$  представляет собой промежуток времени (измеренный в системе отсчета  $B$ ), за который наша частица проходит расстояние  $dz' = u' dt'$ . Тогда, согласно уравнениям (14.4), измеренный в системе  $A$  соответствующий промежуток времени  $dt$  будет равен

$$\begin{aligned} \frac{dt' + v dz'/c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} &= dt' \cdot \frac{1 + \frac{u'v}{c^2}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \\ &= \frac{dt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \left[ 1 + \frac{\frac{uv}{c^2} - \left(\frac{v}{c}\right)^2}{1 - \frac{uv}{c^2}} \right] = dt' \cdot \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{uv}{c^2}}. \quad (16.1) \end{aligned}$$

Так как  $dv'/dt = 0$ , получим уравнения Ньютона в виде

$$\begin{aligned} \frac{m \left(1 - \frac{uv}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \frac{d}{dt} \left[ \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}} \right] = \\ = \frac{m}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \frac{1 - \frac{uv}{c^2} - \left(\frac{u}{c}\right)^2}{1 - \frac{uv}{c^2}} \frac{du}{dt} = F. \end{aligned} \quad (16.2)$$

Отсюда ясно, что законы движения Ньютона *не инвариантны* относительно преобразований Лоренца. Вместе с тем обсуждавшиеся нами опытные факты (как и ряд других данных) свидетельствуют о том, что действительным преобразованием, связывающим между собой системы отсчета, должно быть преобразование Лоренца, а не Галилея и что законы механики остаются инвариантными для разных скоростей системы отсчета. Отсюда следует, что законы Ньютона *не могут быть* истинными законами механики (они лишь приближенные, справедливые в предельном случае, когда отношение  $v/c$  стремится к нулю).

Подход Эйнштейна к этой проблеме был основан на тщательном анализе физического смысла всех изложенных фактов. По определению, закон физики должен выражаться соотношением, справедливым без всяких исключений. Если же он справедлив не во всех случаях, то мы должны искать более общий закон, который позволит установить, когда эти исключения обнаружатся и почему их следует ожидать, иначе мы не можем полагаться на закон вообще (например, если он теряет свою силу в произвольных местах, моментах времени или каких-то особых условиях). Другими словами, *общий закон физики* — это просто утверждение, что существуют определенные *соотношения*, наблюдаемые в принципе в природе, которые инвариантны относительно места, времени, системы отсчета и других условий (например, температуры, давления и т. д.), при которых мы их наблюдаем.

Если истинным преобразованием, связывающим между собой различные системы отсчета, является преоб-

разование Лоренца, то вопрос о виде уравнений механики следует пересмотреть заново. При этом необходимо руководствоваться *принципом относительности*, как называл его Эйнштейн. Он утверждает то, о чем говорилось выше, т. е. законы физики должны быть *соотношениями одного и того же вида* в любой системе отсчета. Существует *частный*, или *специальный*, *принцип относительности*, касающийся *равномерно* движущихся систем, и *общий принцип относительности*, касающийся *произвольных* систем (например, движущихся ускоренно). В этой книге мы, конечно, ограничимся частным принципом относительности.

К принципу относительности можно подойти с более интуитивных позиций, рассматривая космический корабль, движущийся в пустоте и лишенный окон, равно как и любых других средств связи с внешним миром. Согласно принципу относительности, все явления, которые будут наблюдаться *внутри этого корабля*, не должны зависеть вообще от его скорости. Ясно, что теория эфира не удовлетворяет этому требованию, так как, согласно этой теории, свет обладает скоростью *с* относительно эфира, следовательно, наблюдаемая величина скорости света будет зависеть от скорости корабля. Вообще все электромагнитные явления (определяемые уравнениями Максвелла, справедливыми лишь в системе эфира) будут протекать по-разному в зависимости от скорости корабля.

Принцип относительности обладает огромной *эвристической ценностью*. Это значит, что он незаменим при установлении новых законов и соотношений, и не только в механике, но и во многих других областях. Именно если мы знаем соотношение, выполняющееся в ограниченной подсистеме системы отсчета, то принцип относительности приведет нас к обобщенному соотношению, справедливому независимо от систем отсчета, имеющему новое содержание в этих более широких рамках, поддающемуся проверке в дальнейших экспериментах. В последующих главах эта эвристическая роль принципа относительности будет продемонстрирована на ряде конкретных примеров.

---

## Некоторые применения принципа относительности

Чтобы конкретнее понять значение принципа относительности, рассмотрим несколько его применений и убедимся, что этот принцип оказывается способным привести к новым результатам путем инвариантного обобщения соотношений, известных прежде в более узких границах.

Рассмотрим, во-первых, измерение скорости света в движущейся воде<sup>1)</sup>. В течение долгого времени этот вопрос был камнем преткновения дорелятивистской физики и приводил к множеству неясностей, например к задаче о степени увлечения эфира движущейся водой<sup>2)</sup>.

Если  $n$  — коэффициент преломления света в покоящейся жидкой среде, то фазовая скорость света в этой среде равна  $u_0 = c/n$ . Задача состоит в определении фазовой скорости света  $u$ , когда жидкость движется со скоростью  $v$ . Очевидно, что из принципа относительности следует непосредственный и однозначный ответ, причем не требуется никаких других предположений. Согласно этому принципу, те свойства, которые жидкость проявляет в своей системе покоя, должны быть независимы от скорости движения этой системы относительно лаборатории. Поэтому, чтобы узнать, что будет наблюдаться в лабораторной системе отсчета, достаточно подвергнуть преобразованию Лоренца результат, известный для си-

---

<sup>1)</sup> Скорость света равна универсальной постоянной  $c$  лишь в вакууме. В материальных средах скорость света, вообще говоря, отличается от  $c$ .

<sup>2)</sup> Дальнейшие подробности см. в книге Мёллера (C. Möller, *The Theory of Relativity*, Oxford, 1952).

стемы, которая движется с жидкостью. Так как величина фазовой скорости света равна  $c/n$  в системе, связанной с жидкостью, то можно применить релятивистский закон сложения скоростей (15.8), который следует из преобразований Лоренца. Тогда получим

$$u = \frac{u_0 + v}{1 + \frac{u_0 v}{c^2}} = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{cn}} \approx \approx \left( \frac{c}{n} + v \right) \left( 1 - \frac{v}{cn} + \frac{v^2}{c^2 n^2} + \dots \right). \quad (17.1)$$

Отсюда видно, что вода эффективно «увлекает» за собой свет лишь до некоторой степени, т. е. что к фазовой скорости света  $c/n$  добавляется лишь часть величины скорости воды  $v$ .

Полученный закон находится фактически в согласии с результатами всех проведенных до настоящего времени опытов. Такие опыты, можно сказать, действительно подтверждают релятивистский закон сложения скоростей.

Второй пример, который мы рассмотрим, касается процесса распада мезонов. Как известно, мезоны — это нестабильные частицы, рождающиеся в космических лучах или при бомбардировке вещества частицами высокой энергии, ускоренными в лабораторных условиях. Мезоны распадаются, превращаясь в другие частицы. Время распада совокупности мезонов подчиняется статистическим законам, однако каждый вид мезонов имеет свое среднее время жизни  $\tau$ , поддающееся измерению. Оно составляет от  $10^{-6}$  до  $10^{-10}$  сек и менее.

Примем теперь среднее время жизни покоящегося (или медленно движущегося) мезона равным  $\tau_0$ . Тогда можно подсчитать среднее время  $\tau$ , за которое распадется мезон, движущийся со скоростью  $v$ . Согласно принципу относительности, время жизни мезона в той системе отсчета, где мезон покоится, не зависит от скорости движения этой системы (т. е. самого мезона) относительно лаборатории. Теперь легко сосчитать результат перехода к лабораторной системе согласно преобразованию Лоренца, так как время жизни  $\tau_0$  фактически играет роль часов или естественного мерил времени.



Поэтому время жизни в лабораторной системе отсчета дается известной формулой, описывающей замедление хода часов:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (17.2)$$

Следовательно, движущиеся мезоны «проживут» в  $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$  раз больше, чем покоящиеся. Это предсказание проверялось как на мезонах, полученных в лаборатории, так и на мезонах из космических лучей. Во всех случаях предсказанное замедление распада мезонов подтвердилось. Скорость  $v$  некоторых мезонов, рожденных в космических лучах, весьма близка к  $c$ , так что дробь  $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$  достигает значения 1000. Даже в этом крайнем случае релятивистская формула (17.2) остается верной. Таким образом, отлично подтвердилось предсказание теории относительности о том, что часы, движущиеся с разными скоростями, должны идти неодинаково быстро.

Рассмотрим, наконец, эффект Доплера для света, испускаемого движущимся телом (а вместе с ним и эффект абберации света, поскольку оба эти эффекта тесно связаны между собой). Как и раньше, будем исходить из системы отсчета, в которой тело покоится. Из опыта мы знаем, что происходит в этой системе, поэтому для выяснения ситуации в лабораторной системе отсчета достаточно произвести преобразование Лоренца.

Итак, пусть находящееся в состоянии покоя тело излучает свет в направлении, составляющем угол  $\theta_0$  относительно оси  $z_0$ . Положим частоту этого света равной  $\nu_0$ . Так как скорость света равна  $c$ , для длины волны этого излучения получим  $\lambda_0 = c/\nu_0$ .

Пусть то же тело теперь движется в направлении оси  $z$  со скоростью  $v$ . Что покажет наблюдение излучаемого им света в лабораторной системе? Принцип относительности гласит, что картина, наблюдаемая в системе отсчета, где излучатель покоится, не зависит от скорости движения этой системы относительно лабораторной системы отсчета. Чтобы узнать, какую картину мы увидим в лабораторной системе, достаточно произвести соответствующее преобразование Лоренца.

Нам известно уже, что при переходе с помощью преобразования Лоренца к любой системе отсчета мы получаем одну и ту же величину скорости света. *Направление* же распространения этого света и его *частота* в различных системах отсчета будут, вообще говоря, *разными*.

Чтобы вычислить, в каком направлении излучение света будет наблюдаться в лабораторной системе, предположим, что световой луч проходит через точку  $O$ , которую мы примем за начало координат. Если при этом луч лежит, например, в плоскости  $x_0z_0$ , его свет достигнет в момент  $t_0$  точки

$$z_0 = ct_0 \cos \theta_0, \quad x_0 = ct_0 \sin \theta_0, \quad y_0 = 0.$$

Чтобы найти ход того же луча в лабораторной системе, применим преобразование Лоренца (14.4) и получим

$$z = \frac{\cos \theta_0 \cdot ct_0 + vt_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = ct_0 \frac{\cos \theta_0 + (v/c)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

$$x = ct_0 \sin \theta_0, \tag{17.3}$$

$$t = \frac{t_0 + \frac{v}{c} t_0 \cos \theta_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = t_0 \frac{1 + \frac{v}{c} \cos \theta_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Направление светового луча в лабораторной системе отсчета тогда дается формулой

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x}{z} = \sin \theta_0 \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{\cos \theta_0 + (v/c)}. \tag{17.4}$$

Отсюда видно, что при  $\theta_0 \leq \pi/2$  угол, образуемый лучом и осью  $z$  в лабораторной системе, всегда меньше, чем в исходной системе, где излучающее тело покоится. При стремлении отношения  $v/c$  к единице [когда  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$  стремится к нулю] этот эффект заметен особенно сильно. И на самом деле это имеет место в случае космических лучей, в которых встречаются настолько быстрые частицы, что когда они сталкиваются с другими частицами, отношение  $v/c$  в системе центра масс двух частиц становится очень близким к единице. Хотя в системе центра масс частицы разлетаются после столкновения

в среднем в любых направлениях (изотропно), т. е. угол  $\theta_0$  может быть любым, в лабораторной системе отсчета получается узкий конус разлета частиц [с шириной порядка  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ]. Такие узкие конусовидные потоки наблюдаются в космических ливнях высокой энергии, происходящих от столкновений одиночных первичных частиц с атомными ядрами. [Хотя получающиеся при этом частицы, конечно, не достигают скорости света, однако скорость их весьма близка к скорости света, так что к ним с хорошей точностью применимо уравнение (17.4).]

Наблюдаемая ширина конусов находится в хорошем согласии с результатом вычислений, основанных на релятивистских соображениях и использовании той величины скорости движения системы центра масс, которая получается из энергии падающей частицы, измеряемой независимыми методами. Поэтому можно утверждать, что формула (17.4) находится в хорошем согласии с опытом.

Перейдем теперь к вопросу о длине волны света, наблюдаемого в лабораторной системе отсчета. При ее вычислении можно основываться на выражении для фазы плоской волны, распространяющейся в направлении  $\theta_0$ :

$$\Phi = 2\pi \left[ v_0 t_0 - \frac{z_0 \cos \theta_0 + x_0 \sin \theta_0}{\lambda_0} \right], \quad (17.5)$$

где  $\lambda_0 v_0 = c$ . Применяя преобразование Лоренца (14.3), получаем

$$\Phi = \frac{2\pi}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \left[ v_0 \left( t - \frac{vz}{c^2} \right) - (z - vt) \frac{\cos \theta_0}{\lambda_0} - x \frac{\sin \theta_0}{\lambda_0} \right]. \quad (17.6)$$

В лабораторной системе выражение для фазы соответствующей волны имеет вид

$$\Phi = 2\pi \left[ vt - \frac{z \cos \theta + x \sin \theta}{\lambda} \right], \quad (17.7)$$

где  $\lambda v = c$ .

Сравнивая формулы (17.3) и (17.6), находим

$$\begin{aligned} v &= \frac{v_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} + \frac{v}{\lambda_0} \frac{\cos \theta_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \\ &= \frac{v_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta_0 \right), \end{aligned} \quad (17.8)$$

$$\frac{\cos \theta}{\lambda} = \frac{\cos \theta_0}{\lambda_0 \sqrt{1-(v/c)^2}} + \frac{v}{c^2} \frac{v_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}, \quad (17.9)$$

$$\frac{\sin \theta_0}{\lambda_0} = \frac{\sin \theta}{\lambda}. \quad (17.10)$$

Используя равенство

$$\lambda_0 v_0 = c = \lambda v,$$

получаем

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta_0} = \frac{v_0}{v}, \quad \cos \theta = \frac{v_0}{v \sqrt{1-(v/c)^2}} \left( \cos \theta_0 + \frac{v}{c} \right), \quad (17.11)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin \theta_0 \sqrt{1-(v/c)^2}}{\cos \theta_0 + \frac{v}{c}}.$$

Последнее соотношение, очевидно, совпадает с (17.4), полученным при рассмотрении направления световых *лучей* (нормалей к волновым фронтам). Такое совпадение результатов, касающихся направления распространения света, в этих двух разных подходах совершенно естественно, так как направление распространения света совпадает с направлением нормали к волновому фронту (поверхности постоянной фазы  $\Phi$ ).

Из соотношения (17.11) следует

$$\begin{aligned} \cos \theta_0 &= -\frac{v}{c} + \frac{v}{v_0} \cos \theta \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}, \\ v &= \frac{v_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \left[ 1 + \frac{v}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \cos \theta \right], \quad (17.12) \\ \frac{v}{v_0} &= \frac{\sqrt{1-(v/c)^2}}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta}. \end{aligned}$$

Когда отношение  $v/c$  стремится к нулю, последнее выражение, конечно, стремится к известной нерелятивистской формуле эффекта Доплера

$$\frac{\nu}{\nu_0} \approx \frac{1}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta}.$$

В общем случае, однако, в (17.12) фигурирует новая релятивистская поправка, включающая  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ . В случае перпендикулярности вектора скорости тела к направлению светового луча (которое определяется в лабораторной системе) формула (17.12) принимает вид

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad \text{или} \quad \frac{T}{T_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (17.13)$$

где  $T$  — период колебаний световой волны.

Такой поперечный эффект Доплера отсутствует в нерелятивистской теории. В релятивистском случае его существование объясняется тем, что период колебаний волны можно рассматривать как своего рода «часы», ввиду чего при переходе от одной системы отсчета к другой, движущейся со скоростью  $v$  относительно первой, происходит увеличение этого периода в  $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$  раз.

Исследование поперечного эффекта Доплера в излучении движущихся атомов подтверждает справедливость релятивистской формулы и может считаться в дальнейшем одной из проверок релятивистского предсказания о замедлении хода часов, когда наблюдение ведется в системе, относительно которой часы находятся в движении.

---

*Импульс и масса  
в теории относительности*

На основании уравнения (16.2) мы заключили, что законы движения Ньютона не инвариантны относительно преобразований Лоренца, а потому, согласно принципу относительности, их нельзя считать истинными законами механики (кроме того случая, когда отношение  $v/c \ll 1$ ). В соответствии с представлениями, изложенными в гл. 15 и 16, мы должны в первую очередь обобщить эти законы так, чтобы получить новую систему уравнений, инвариантную при преобразованиях Лоренца.

Производя такое обобщение, удобно записать законы Ньютона через импульс  $\mathbf{p}$  рассматриваемого тела. Тогда они примут вид

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}, \quad (18.1)$$

где

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \quad (18.2)$$

и

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (\text{постоянство массы}). \quad (18.3)$$

*Полный* импульс  $\mathbf{P}$  и полная масса  $M$  системы тел определяются формулами

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i, \quad M = \sum_{i=1}^N m_i, \quad (18.4)$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы, а  $\mathbf{v}_i$  — ее скорость. Скорость центра масс системы тел при этом равна

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{P}}{M}. \quad (18.5)$$

В механике Ньютона хорошо известна теорема, утверждающая, что полный импульс изолированной системы удовлетворяет уравнению

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = 0,$$

т. е.  $\mathbf{P}$  — постоянный вектор. Из равенства (18.3) также следует, что полная масса такой системы неизменна.

Эти законы сохранения импульса и массы по своей форме, очевидно, много проще уравнений Ньютона, и поэтому их, по-видимому, гораздо легче обобщить. Выполнив такое обобщение, мы обратимся к релятивизации самих законов Ньютона (в гл. 21).

Основная идея нашего подхода заимствована по существу из физических теорий, когда при анализе физической системы ее разбивают на части или на компоненты. В теории сплошных сред, например в гидродинамике, мы рассматриваем жидкость как состоящую из малых по объему элементов, а в теории дискретного атомного строения вещества подобным же образом считаем, что система состоит из малых элементов, в качестве которых теперь берутся атомы. В обоих этих случаях *полный импульс* системы представляется в виде суммы импульсов ее частей. То же самое относится к полной массе и к полной энергии системы. Кроме того, по крайней мере в границах применимости теории Ньютона, и эксперимент, и теория показывают, что эти системы подчиняются законам сохранения импульса, массы и энергии.

Ввиду существования таких законов сохранения полный импульс и массу (а также энергию) системы можно рассматривать не только как суммы соответствующих характеристик всех частей этой системы, но и как *единое целое*, причем в случае изолированной системы их значение остается неизменным. Важно, что поведение этих полных величин не зависит от изменений, которым подвергаются отдельные части физической системы в ходе весьма сложных взаимодействий. Именно на этом основании можно рассматривать отдельные материальные тела как простые макроскопические объекты, игнорируя неизвестные нам и не поддающиеся описанию

сложные особенности движения составляющих их молекул.

Ясно, что возможность рассматривать материальные тела как в виде суммы составляющих их частей, так и в виде единого целого, является универсальным свойством объектов нашего мира. Значит, это свойство должно быть отражено в любой системе законов механики, которую мы будем строить, если требуется, чтобы эти законы полностью соответствовали *всем* известным опытным фактам.

Свойства, описанные выше, были впервые установлены в нерелятивистской теории. Однако, согласно принципу относительности, основные физические свойства системы не зависят от движения этой системы относительно наблюдателя. Поэтому следует считать, что эту систему можно продолжать рассматривать и как целое, и как совокупность ее частей, и при этом будут выполняться те же самые законы сохранения, если даже эта физическая система будет двигаться с большой скоростью относительно лабораторной системы отсчета. Мы увидим, что это требование вместе с законом преобразования Лоренца от одной системы отсчета к другой достаточно для вывода правильных релятивистских выражений для импульса, массы и энергии.

Чтобы придать обсуждавшимся выше представлениям математический вид, запишем прежде всего полный импульс системы  $\mathbf{P}$  в виде суммы импульсов  $\mathbf{p}_i = m_i \mathbf{v}_i$  ее составных частей:

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i, \quad (18.6)$$

где  $\mathbf{v}_i$  — скорость  $i$ -й частицы в системе из  $N$  частиц, а  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы. При этом полная масса системы равна

$$M = \sum_{i=1}^N m_i. \quad (18.7)$$

Если можно продолжать рассматривать систему частиц как образующую единое целое, то необходимо, чтобы эта система обладала «общей скоростью», которую



мы обозначим через  $\mathbf{V}$ , так что полный импульс системы будет выражаться формулой

$$\mathbf{P} = M\mathbf{V}.$$

Тогда

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{P}}{M} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i}{\sum_{i=1}^N m_i}, \quad (18.8)$$

очевидно, представляет собой среднюю скорость, в которую каждая частица системы вносит вклад соответственно своей массе.

В нерелятивистской механике вектор  $\mathbf{V}$  также описывает скорость центра масс системы. Однако оказывается, что в теории относительности понятие центра масс сложнее и не обладает столь же отчетливым физическим смыслом, как в нерелятивистской теории. (Причина этого заключается в том, что в релятивистской физике нет универсального «центра масс» как точки, которая не зависела бы от выбора системы отсчета<sup>1)</sup>.) Тем не менее, определив  $\mathbf{V}$  как среднюю (с соответствующими весовыми коэффициентами) скорость, можно надеяться, что она будет обладать должными свойствами и характеризовать скорость всей системы в целом.

Мы приступим теперь к выводу релятивистских выражений для массы и импульса как функций скорости. Это удобно сделать, рассматривая систему двух частиц вначале в системе отсчета  $B$ , где скорость центра масс равна нулю. Ограничимся сейчас одномерным случаем (обобщение на случай трех измерений проведем позднее). Если массы частиц равны  $m_1$  и  $m_2$ , а скорости соответствуют  $v_1$  и  $v_2$ , то полный импульс системы имеет вид

$$P = m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0. \quad (18.9)$$

Так как полная масса при этом равна

$$M = m_1 + m_2, \quad (18.10)$$

<sup>1)</sup> Этот вопрос обсуждался Мёллером [C. Möller, Ann. Inst. Henri Poincaré, II, 251 (1949)].

то скорость центра масс, по определению, можно записать в виде

$$V = \frac{P}{M} = 0. \quad (18.11)$$

Рассмотрим теперь эту же систему двух частиц в другой системе отсчета  $A$ , в которой скорость центра масс равна  $V'$  (направлена также вдоль оси  $z$ ). Пусть в этой новой системе отсчета массы наших частиц равны  $m'_1$  и  $m'_2$ , а скорости равны  $v'_1$  и  $v'_2$ . При этом из принципа относительности следует, что в системе отсчета  $A$  нашу систему можно представить в виде суммы ее частей, так же как мы это делали в системе отсчета  $B$ . Поэтому и полный импульс частиц можно записать в виде суммы

$$P' = m'_1 v'_1 + m'_2 v'_2. \quad (18.12)$$

Подобным же образом выражается и полная масса системы:

$$M' = m'_1 + m'_2. \quad (18.13)$$

Вспомним, что в системе отсчета  $B$ , где скорость центра масс была равна нулю, мы могли также рассматривать нашу систему как единое целое, обладающее массой  $M = m_1 + m_2$  и общей скоростью  $V$  (равной в этом случае нулю). Согласно принципу относительности, к этой системе частиц можно подойти точно так же и в системе отсчета  $A$ , поэтому

$$P' = M' V'. \quad (18.14)$$

Из соотношения (18.9) следует

$$\frac{m_1}{m_2} = - \frac{v_2}{v_1}. \quad (18.15)$$

На основании (18.12) — (18.14) получим

$$m'_1 v'_1 + m'_2 v'_2 = (m'_1 + m'_2) V', \quad (18.16)$$

откуда

$$\frac{m'_1}{m'_2} = - \frac{V' - v'_2}{V' - v'_1}. \quad (18.17)$$

Релятивистский закон сложения скоростей (15.8) дает

$$v'_1 = \frac{v_1 + V'}{1 + \frac{v_1 V'}{c^2}}, \quad v'_2 = \frac{v_2 + V'}{1 + \frac{v_2 V'}{c^2}}. \quad (18.18)$$

Подставляя эти выражения в (18.17), после несложных вычислений находим

$$\frac{m'_1}{m'_2} = \frac{1 + \frac{v_1 V'}{c^2}}{1 + \frac{v_2 V'}{c^2}} \frac{v_2}{v_1} \quad (18.19)$$

и, учитывая соотношение (18.15), получаем

$$\frac{m'_1}{m'_2} = \frac{1 + \frac{v_1 V'}{c^2}}{1 + \frac{v_2 V'}{c^2}} \frac{m_1}{m_2}. \quad (18.20)$$

Этот результат удобнее представить в виде

$$\frac{m'_1/m_1}{m'_2/m_2} = \frac{1 + \frac{v_1 V'}{c^2}}{1 + \frac{v_2 V'}{c^2}}. \quad (18.21)$$

Нетрудно, однако, получить и другое выражение для правой части этого равенства. Для этого рассмотрим сначала закон преобразования величины  $\beta = \sqrt{1 - (v'_1/c)^2}$ . Напишем прежде всего

$$\begin{aligned} \beta &= \sqrt{1 - (v'_1/c)^2} = \sqrt{1 - \frac{(v_1 + V')^2}{c^2 [1 + (v_1 V'/c^2)]^2}} = \\ &= \frac{\sqrt{1 - (V'/c)^2} \sqrt{1 - (v_1/c)^2}}{1 + (v_1 V'/c^2)}, \end{aligned} \quad (18.22)$$

откуда следует

$$\frac{m'_1/m_1}{m'_2/m_2} = \frac{\sqrt{1 - (v_1/c)^2} / \sqrt{1 - (v'_1/c)^2}}{\sqrt{1 - (v_2/c)^2} / \sqrt{1 - (v'_2/c)^2}} = \frac{R(v_1, v'_1)}{R(v_2, v'_2)}, \quad (18.23)$$

где использованы обозначения

$$R(v_1, v'_1) = \frac{\sqrt{1 - (v_1/c)^2}}{\sqrt{1 - (v'_1/c)^2}}, \quad (18.24)$$

$$R(v_2, v'_2) = \frac{\sqrt{1 - (v_2/c)^2}}{\sqrt{1 - (v'_2/c)^2}}.$$

Заметим теперь, что соотношение (18.23) должно выполняться при произвольных  $v_1$ ,  $v'_1$ ,  $v_2$  и  $v'_2$ <sup>1)</sup>. Тогда в эквивалентном ему равенстве

$$\frac{m'_1/m_1}{R(v_1, v'_1)} = \frac{m'_2/m_2}{R(v_2, v'_2)} \quad (18.25)$$

левая часть содержит лишь величины, относящиеся к первой частице, тогда как в правой части фигурируют лишь характеристики второй частицы. Ввиду произвольного выбора скоростей каждой из этих двух частиц равенство (18.25) имеет смысл лишь в том случае, если обе его стороны равны одной и той же постоянной  $K$ , не зависящей от величин, фигурирующих в этом равенстве. Иными словами,

$$\frac{m'_1}{m_1} = KR(v_1, v'_1) = K \frac{\sqrt{1 - (v_1/c)^2}}{\sqrt{1 - (v'_1/c)^2}}, \quad (18.26)$$

$$\frac{m'_2}{m_2} = KR(v_2, v'_2) = K \frac{\sqrt{1 - (v_2/c)^2}}{\sqrt{1 - (v'_2/c)^2}}. \quad (18.27)$$

В частном случае, когда  $v_1 = 0$ , имеем

$$\frac{m'_1}{m_1} = \frac{K}{\sqrt{1 - (v'_1/c)^2}}. \quad (18.28)$$

При этом  $m_1$  является массой частицы, когда последняя покоится. Но это и есть обычная масса, фигурирующая в нерелятивистских уравнениях движения Ньютона

<sup>1)</sup> Далее в оригинале приведен без всякой необходимости усложненный расчет, который в переводе упрощен. — Прим. перев.

(справедливых, когда отношение  $v/c$  стремится к нулю). Обозначим эту массу покоя через  $m_{10}$ . Тогда

$$m'_1 = \frac{K m_{10}}{\sqrt{1 - (v'_1/c)^2}}. \quad (18.29)$$

Перейдем теперь к более частному случаю, когда  $v'_1 = 0$ . Мы должны получить при этом  $m'_1 = m_{10}$ , откуда следует, что  $K = 1$ . Очевидно, что такой же вывод можно получить и для второй частицы. Следовательно, для каждой из наших частиц выполняется соотношение

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (18.30)$$

При этом импульс частицы будет равен

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (18.31)$$

Мы получили, таким образом, релятивистские выражения для массы и импульса. Заметим, что масса зависит от скорости и не является постоянной, какой она была в теории Ньютона.

Полученные результаты легко распространить на случай системы  $N$  частиц. Сначала можно применить их к любым двум частицам из этой системы и говорить о них как о единой подсистеме с полной массой  $M = m_1 + m_2$ , полным импульсом  $P = p_1 + p_2$  и общей скоростью  $V = P/M$ . Эту подсистему можно затем рассматривать как отдельную частицу и, комбинируя ее с третьей частицей, получить новую пару, к которой применить все только что сформулированные процедуры. Теперь мы уже рассматриваем три частицы как единое целое. По индукции описанный процесс можно продолжать до тех пор, пока мы не включим всех частиц рассматриваемой системы. При этом нетрудно показать, что если соотношения (18.30) и (18.31) справедливы для каждой частицы, то всю систему можно разложить релятивистски инвариантным образом на любые комбинации своих частей, т. е. так, что это разложение будет иметь место во всех системах отсчета, связанных между собой преобразованиями Лоренца.

Отсюда следует, что в *каждой* системе отсчета будет справедлива одна и та же связь между величинами в определениях полной массы и полного импульса:

$$M = \sum_{i=1}^N \frac{m_{0i}}{\sqrt{1 - (v_i/c)^2}},$$

$$P = \sum_{i=1}^N \frac{m_{0i} v_i}{\sqrt{1 - (v_i/c)^2}}.$$
(18.32)

Если частицы друг с другом взаимодействуют, то массы и импульсы отдельных частиц могут, вообще говоря, изменяться. Из нерелятивистской механики известно, что *полные* масса и импульс системы сохраняются, даже если эти характеристики отдельных ее частей изменяются в результате взаимодействия. Нетрудно найти релятивистское обобщение этих свойств в том смысле, что если полная масса или полный импульс сохраняются в какой-либо лоренцевой системе отсчета, то они будут сохраняться и в любой другой такой системе. Для доказательства обратимся к соотношению (18.22) и запишем с его помощью массу  $i$ -й частицы в штрихованной системе отсчета:

$$m'_i = \frac{m_{0i}}{\sqrt{1 - (v'_i/c)^2}} = \frac{m_{0i} (1 + v_i V'/c^2)}{\sqrt{1 - (v_i/c)^2} \sqrt{1 - (V'/c)^2}} =$$

$$= \frac{m_i + p_i V'/c^2}{\sqrt{1 - (V'/c)^2}},$$
(18.33)

$$M' = \sum_{i=1}^N m'_i = \frac{1}{\sqrt{1 - (V'/c)^2}} \sum_{i=1}^N \left( m_i + \frac{p_i V'}{c^2} \right).$$

Здесь  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы в нештрихованной системе, а  $p_i$  — ее импульс. Если в нештрихованной системе полная масса  $\sum_i m_i$  и полный импульс  $\sum_i p_i$  сохраняются, то (из постоянства  $V'$ ) следует, что полная масса  $\sum_i m'_i$  в штрихованной системе также сохраняется. Тогда из соотношения (18.14) следует, что в этой последней системе отсчета сохраняется и полный импульс

$$P' = M' V'.$$

Чтобы лучше разобраться в сущности релятивистских законов сохранения, рассмотрим в качестве примера столкновение двух частиц. Пусть массы и скорости этих частиц до и после столкновения соответственно равны  $m_1^A, m_2^A, v_1^A, v_2^A$  и  $m_1^B, m_2^B, v_1^B, v_2^B$ . Если эти частицы движутся настолько медленно, что к ним применима нерелятивистская механика, то известно, что имеют место равенства

$$m_1^A v_1^A + m_2^A v_2^A = m_1^B v_1^B + m_2^B v_2^B \quad (18.34)$$

(закон сохранения полного импульса)

и

$$m_1^A = m_1^B, \quad m_2^A = m_2^B \quad (18.35)$$

(постоянство массы каждой частицы).

Рассмотрим теперь этот процесс столкновения в другой системе отсчета, где скорость центра масс частиц велика. Из анализа, проведенного в этой главе, видно, что закон сохранения полного импульса (18.34) будет справедлив и в новой системе, если взять новые значения массы и импульса частиц, согласно формулам (18.30) и (18.31). Однако вместо равенств (18.35), выражающих постоянство масс отдельных частиц, мы получим теперь

$$m_1^A + m_2^A = m_1^B + m_2^B, \quad (18.36)$$

т. е. закон сохранения *полной массы* системы, тогда как индивидуальные массы частиц, вообще говоря, будут изменяться [как и должно быть, согласно формуле (18.30), так как масса частицы зависит от ее скорости, а последняя изменяется в результате столкновения].

Все выводы, полученные до сих пор, основывались на предположении, что движение происходит в направлении оси  $z$ . Однако при анализе этих проблем в случае трех измерений получаются по существу те же самые результаты, что легко увидеть при более подробных расчетах, которые мы здесь опустим. Для массы сохраняется соотношение, подобное (18.30), лишь с той разницей, что под  $v$  следует понимать абсолютную величину вектора скорости частицы, так что  $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ , где  $v_x, v_y, v_z$  — компоненты этого вектора.

У импульса теперь будет тоже три компоненты. Поэтому в векторных обозначениях можно записать

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (18.37)$$

и

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (18.38)$$

При этом сохраняются как полная масса изолированной физической системы, так и все компоненты ее полного импульса.

Полученная зависимость массы от скорости, конечно, совпадает с предсказываемой в теории Лоренца, где она была следствием «противодействующей э. д. с.», которая действует на электрон и возникает в результате изменения магнитного поля, происходящего при ускорении этого электрона (см. гл. 6).

Стоя на эйнштейновских позициях, мы не отрицаем, что масса электрона может быть частично или даже целиком электромагнитного происхождения. Тем не менее мы не ставим определение взаимосвязи между массой и скоростью в зависимость от выбора конкретной модели электрона, как это было в теории Лоренца. Напротив, мы видим, что масса *независимо от своего происхождения* должна проявлять именно такую зависимость от скорости, если рассмотренные в этой главе общие свойства законов физики обладают релятивистской инвариантностью, т. е. не изменяют своего вида во всех системах отсчета, связанных преобразованиями Лоренца.



---

*Эквивалентность массы  
и энергии*

Перейдем теперь к следующему великому открытию Эйнштейна, ясно продемонстрировавшему революционизирующую мощь его релятивистского подхода, — к доказательству эквивалентности массы и энергии, выражающейся знаменитой ныне формулой

$$E = mc^2.$$

Для вывода этого закона будем исходить из выражения (18.37) для массы движущегося объекта

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Если отношение  $v/c$  мало, то можно разложить  $m$  в ряд по степеням  $v/c$ , ограничиваясь лишь членами порядка  $v^2/c^2$  включительно. Получим

$$m \approx m_0 \left( 1 + \frac{v^2}{2c^2} + \dots \right). \quad (19.1)$$

Умножив этот ряд на  $c^2$ , найдем

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2} + \dots \quad (19.2)$$

Однако  $m_0v^2/2$  представляет собой в точности нерелятивистское выражение *кинетической энергии*  $T$  тела, движущегося со скоростью  $v$ , а  $m_0c^2$  — просто константа. Следовательно, в этом приближении можно записать

$$mc^2 - m_0c^2 = T. \quad (19.3)$$

Закон сохранения полной массы системы, найденный в предыдущей главе, оказывается тогда совпадающим с

законом сохранения полной энергии этой же системы тел, по крайней мере в нерелятивистском пределе. Однако принцип относительности требует, чтобы закон выполнялся во всех системах отсчета, если он справедлив хотя бы в одной системе. Поэтому разность (19.3) должна описывать кинетическую энергию тела в любой системе отсчета, даже если разложение до члена порядка  $v^2/c^2$  включительно уже не является хорошим приближением.

Понять значение этого заключения проще, если перенести  $m_0c^2$  в другую сторону равенства. Энергию тела тогда можно определить выражением

$$E = m_0c^2 + T = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \quad (19.4)$$

Так можно поступать всегда, потому что в нерелятивистской теории энергия определяется лишь с точностью до произвольной постоянной. На языке математики этот шаг Эйнштейна можно назвать точным определением этой произвольной постоянной, т. е.

$$E_0 = m_0c^2. \quad (19.5)$$

Физически это соответствует предположению, что частица, находясь в состоянии покоя, обладает энергией покоя.

Каков смысл этой энергии покоя? Возможно, что нам удастся понять его, заметив, что внешние покоящиеся обычные предметы состоят из частей (молекул, атомов, ядер и т. д.), которые чрезвычайно быстро движутся, но так, что в среднем это движение скрадывается при наблюдении в макроскопических масштабах. Тем не менее в силу рассмотренных в предыдущей главе законов все эти движения приводят к возрастанию масс частиц системы согласно соотношению

$$m_i = \frac{m_{0i}}{\sqrt{1-(v_i/c)^2}} \approx m_{0i} + \frac{m_{0i}v_i^2}{2c^2} = m_{0i} + \frac{T_i}{c^2}. \quad (19.6)$$

Тогда полная масса всей системы равна

$$M = \sum_i \left( m_{0i} + \frac{T_i}{c^2} \right) = \sum_i m_{0i} + \frac{T}{c^2}, \quad (19.7)$$

где  $T$  — полная кинетическая энергия всех частиц. Умножив это выражение на  $c^2$ , получим

$$Mc^2 = \sum_i m_{0i}c^2 + T.$$

Встает вопрос: можно ли экспериментальным путем как-то проверить, вносит ли внутреннее движение частиц вклад в массу всего тела? Оказывается, что имеется несколько возможных способов сделать это. Проще всего было бы повысить температуру рассматриваемого тела и посмотреть, увеличится ли при этом его вес на величину  $Q/c^2$ , где  $Q$  — количество тепловой энергии, поглощенной этим телом. Однако трудность здесь в том, что достижимые повышения температуры (максимум на несколько тысяч градусов Цельсия) соответствуют слишком малым значениям  $Q/c^2$ , не поддающимся обнаружению современными методами. (Это обусловлено главным образом тем, что величина  $c^2$  весьма велика.) Другой пример: при химической реакции, протекающей между двумя веществами, может выделиться энергия  $\Delta E$ . Тогда масса прореагировавшей смеси должна быть меньше суммы масс вступавших в реакцию веществ на  $\Delta E/c^2$ . Опять-таки эта величина слишком мала, чтобы ее удалось экспериментально обнаружить.

Спустя некоторое время после того, как Эйнштейн теоретически доказал эквивалентность массы и энергии, были на опыте изучены ядерные превращения. В этих процессах выделялось достаточно большое количество энергии, так что с помощью аппаратуры того времени можно было, действительно, обнаружить неравенство суммы масс исходных веществ и продуктов реакции. Было проведено множество таких измерений, и все опыты подтвердили предсказание Эйнштейна о том, что изменение полной массы системы должно быть равно  $Q/c^2$ .

Упомянутые выше опыты показывают, что по крайней мере *часть* массы покоя предметов можно отнести за счет внутренних движений. При этом если состояние движения изменяется и выделяется энергия  $Q$ , то масса системы уменьшается на  $Q/c^2$ . Но можно ли доказать вообще утверждение Эйнштейна о том, что *всю* массу по-

коя предметов можно связать подобным образом с энергией?

Через несколько лет после того, как были исследованы первые ядерные превращения, удалось открыть новые частицы, получившие название *позитронов*. Их масса совпадает с массой электронов, а заряд отличается лишь знаком. Оказалось, что при соединении электрона и позитрона эти две частицы взаимно *аннигилируют*, причем вместо них не остается никаких частиц в обычном смысле, а только два гамма-кванта, обладающих полной энергией  $Q=2m_e c^2$  (в дальнейшем превращающейся в тепловую энергию в результате столкновений этих гамма-квантов с атомами и электронами). Этот факт показал, что *вся* энергия покоя электрона обладает потенциальной способностью превращаться в другие формы энергии, например в тепловую.

С тех пор как был открыт позитрон, науке стали известны частицы, именуемые «антипротонами» (их масса совпадает с массой протона, а заряд отличается от заряда протона лишь знаком). Антипротоны аналогичным образом аннигилируют с протонами. Теперь уже известно, что каждому виду фундаментальных частиц соответствуют реально существующие античастицы с той же массой и должным образом связанными другими характеристиками (например, зарядом и спином). Соединение частицы с ее античастицей дает лишь энергию в той или иной форме. Было показано также, что при столкновении гамма-кванта с атомным ядром этот квант может исчезнуть, причем его энергия превратится в энергию покоя, например, электрон-позитронной пары. Эта пара *рождается* в таком процессе, так как входящие в нее частицы до этого не существовали. Таким образом, имеются решающие экспериментальные доказательства того, что часть или всю «энергию покоя» тела можно превратить в другие виды энергии, причем возможен также обратный процесс превращения других видов энергии в энергию покоя.

Факт эквивалентности массы и энергии не был обнаружен ранее лишь по той причине, что, как мы уже говорили, до открытия ядерных реакций величина массы  $Q/c^2$ , связанной с энергией  $Q$ , была ниже порога

наблюдаемости. С другой стороны, это, конечно, означает, что в энергии покоя вещества «таятся» гигантские энергетические резервы. Эта энергия частично высвобождается в процессах ядерного деления в атомных реакторах, а также в процессах ядерного синтеза, спонтанно протекающих в Солнце и в других звездах.

Эйнштейн указал простой физический пример, позволяющий легче понять, почему масса и энергия связаны друг с другом соотношением  $E=mc^2$ . Он рассмотрел для этого покоящийся относительно лаборатории ящик массы  $M_B$ . Пусть этот ящик заполнен электромагнитным излучением, находящимся в термодинамическом равновесии с его стенками. Обозначим энергию этого излучения через  $E_R$ .

Известно, что электромагнитное излучение оказывает давление на стенки содержащего его ящика, подобно давлению, вызываемому газом. Пока ящик покоится или движется равномерно, полная сила, приложенная к каждой его стенке, уравнивается силой, приложенной к противоположной стенке. Если же ящик подвергается ускорению  $a$ , то благодаря этому ускорению отражающееся от задней стенки ящика излучение будет приобретать дополнительный импульс, тогда как излучение, отражающееся от его передней стенки, будет терять часть своего импульса.

Если произвести подробный подсчет происходящего при этом изменения давления на стенки движущегося ящика, то окажется, что полная сила, действующая на ящик со стороны излучения, равна

$$F_R = -\frac{E_R a}{c^2}.$$

Эта сила направлена против ускорения. Поэтому уравнение движения всей системы будет иметь вид

$$M_B a = -\frac{E_R a}{c^2} + F, \quad (19.8)$$

где  $F$  — внешняя сила. Это уравнение можно переписать:

$$\left(M_B + \frac{E_R}{c^2}\right) a = F. \quad (19.9)$$

Поэтому наличие энергии излучения  $E_R$  соответствует появлению добавочной «эффективной массы»  $E_R/c^2$  в том смысле, что эта масса приводит к такому же возрастанию инертности тела (его сопротивления ускорению), как и обычная масса, что и представляет собой одно из характерных проявлений того физического свойства, которое называют «массой».

Легко заметить, что пример, рассмотренный Эйнштейном, очень похож на обсуждавшийся нами выше, где мы говорили о вкладе в полную массу системы со стороны *внутренних движений* различных частиц системы. В примере Эйнштейна вместо этого рассматривается вклад со стороны внутренних движений электромагнитного излучения, благодаря чему становится ясно, что появление добавочной массы происходит независимо от природы соответствующей ей энергии.

*Релятивистский закон  
преобразования энергии  
и импульса*

Мы уже видели в предыдущих главах, что импульс и энергия каждого объекта (равно как и его масса, пропорциональная этой энергии) зависят от скорости этого объекта и выражаются формулами

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (20.1)$$

$$\mathbf{p} = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (20.2)$$

Предположим, что нам известны значения  $E$  и  $\mathbf{p}$  в данной системе отсчета  $A$ . Можно ли указать преобразование, аналогичное преобразованию Лоренца для  $\mathbf{x}$  и  $t$ , которое давало бы значения  $E'$  и  $\mathbf{p}'$ , измеренные в новой системе  $B$ , движущейся относительно  $A$  со скоростью  $\mathbf{V}$ ?

Для простоты ограничимся одномерным случаем (направим все скорости вдоль оси  $z$ ). Значения  $E$  и  $\mathbf{p}$  в системе  $A$  заданы. Требуется вычислить в системе отсчета  $B$  соответствующие значения  $E'$  и  $\mathbf{p}'$ . Примем скорость тела равной  $v$  в системе  $A$  и  $v'$  в системе  $B$ .

Здесь удобно использовать соотношение (18.22). Заметим, однако, что в формулах (18.15), (18.17) и (18.19) через  $v'$  обозначена скорость объекта, измеренная в системе, движущейся со скоростью  $V' = -V$  относительно системы отсчета  $A$ . Взяв обратные значения величин, стоящих в обеих сторонах соотношения (18.22), и подставив  $V' = -V$ , получим

$$\frac{1}{\sqrt{1 - (v'/c)^2}} = \frac{1 - (vV/c^2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2} \sqrt{1 - (V/c)^2}}. \quad (20.3)$$

Так как

$$E' = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v'/c)^2}}, \quad E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

и

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

то

$$E' = \frac{E - Vp}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}. \quad (20.4)$$

Если теперь учесть релятивистский закон сложения скоростей

$$v' = \frac{v - V}{1 - (vV/c^2)},$$

то получим

$$p' = \frac{m_0 v'}{\sqrt{1 - (v'/c)^2}} = \frac{m_0 (v - V)}{\sqrt{1 - (V/c)^2} \sqrt{1 - (v'/c)^2}} = \frac{p - (VE/c^2)}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}. \quad (20.5)$$

Соотношения (20.4) и (20.5) по существу повторяют форму уравнений преобразования Лоренца (14.3), но здесь вместо  $z$  стоит  $p$ , а вместо  $t$  стоит  $E/c^2$ . Следовательно, энергию и импульс тела в одной системе отсчета можно найти, исходя из значений его энергии и импульса в другой системе, с помощью преобразований, подобных преобразованиям Лоренца.

Это рассуждение без труда обобщается на случай трех измерений. Как и для координат  $x$  и  $y$ , мы здесь имеем

$$p'_x = p_x, \quad p'_y = p_y. \quad (20.6)$$

В векторных обозначениях полученные преобразования принимают вид

$$E' = \frac{E - (Vp)}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}, \quad (20.7)$$

$$p' = p - (pV_0) V_0 + \frac{(pV_0) V_0 - (VE'/c^2)}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}, \quad (20.8)$$

где  $V_0$  — единичный вектор в направлении  $V$ .

Из вышеизложенного следует, что доказательство инвариантности выражения (9.7) для квадрата интервала



$s^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$  относительно преобразований Лоренца аналогично доказательству подобной же инвариантности величины  $E^2 - c^2 p^2$ .

Для выяснения смысла этой величины определим ее значение в той системе отсчета, где рассматриваемое тело покоится, так что  $\mathbf{p} = 0$ . Тогда

$$E^2 - c^2 p^2 = E_0^2 = m_0^2 c^4.$$

Однако в силу инвариантности выражения  $E^2 - c^2 p^2$  его значение должно быть одинаково во всех системах отсчета, и поэтому вообще

$$E^2 - c^2 p^2 = m_0^2 c^4. \quad (20.9)$$

Особенно интересен случай, когда масса покоя равна нулю. При этом

$$E^2 - c^2 p^2 = 0. \quad (20.10)$$

Если взять ось  $z$ , совпадающую по направлению с импульсом  $\mathbf{p}$ , то

$$E = \pm c p_z. \quad (20.11)$$

Любопытно, что из теории относительности следует возможность существования отличных от нуля энергии и импульса у частицы с равной нулю массой покоя. Чтобы понять смысл этого утверждения, возьмем частицу с очень малой массой покоя  $m_0$  и будем затем устремлять  $m_0$  к нулю. Если скорость частицы равна  $v$ , то ее энергия и импульс имеют вид

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (20.12)$$

При постоянном и меньшем единицы значении  $v/c$  величины  $E$  и  $p$  стремятся к нулю при стремлении к нулю  $m_0$ . Если же мы будем устремлять  $v/c$  к единице при стремлении  $m_0$  к нулю так, чтобы отношение  $m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$  оставалось равным постоянной величине  $R$ , мы получим

$$E \rightarrow R c^2, \quad p \rightarrow R c, \quad E^2 - c^2 p^2 \rightarrow 0 \quad (20.13)$$

в согласии с (20.10). Следовательно, имея равную нулю массу покоя, тело может обладать отличными от нуля

энергией и импульсом в том и только в том случае, если оно движется со скоростью света.

Можно подойти к этому вопросу и с другой стороны. Если  $m_0 \neq 0$ , то при ускорении такой частицы до скорости света ее энергия

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

и импульс

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

обращаются в бесконечность. Так как реально доступными могут быть только конечная энергия и конечный импульс, наша частица в действительности никогда не сможет достичь скорости света. Если же  $m_0 = 0$ , то, как мы видели, частица, двигаясь со скоростью  $c$ , может обладать конечными энергией и импульсом.

Следовательно, заключение о том, что никакой объект не может обладать скоростью света, приложимо лишь к объектам с отличной от нуля массой покоя. Объект же, у которого отсутствует масса покоя, может находиться *лишь* в состоянии движения со скоростью света. Поэтому можно сказать, что, хотя ничто не может быть *ускорено* до скорости света, могут быть объекты, движущиеся со скоростью света. Это движение не будет результатом предшествующего ускорения, а будет вообще единственным состоянием, в котором эти объекты могут существовать.

Физический смысл движения со скоростью света будет обсуждаться позднее.

## Заряженные частицы в электромагнитном поле

Ранее мы уже установили, что релятивистские выражения для энергии, массы и импульса резко отличаются от используемых в теории Ньютона и сводятся к последним лишь в пределе  $v/c \rightarrow 0$ . Для изолированной системы релятивистские законы движения выражаются уравнениями

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = 0, \quad \mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \quad (21.1)$$

К ним следует еще добавить закон сохранения массы. В теории Ньютона он содержался в предположении, что массы всех частиц, входящих в состав системы, постоянны, т. е.  $dm_i/dt = 0$  [уравнение (18.3)], где  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы. В теории Эйнштейна масса каждой частицы может, однако, изменяться. При этом масса и энергия эквивалентны друг другу согласно соотношению  $E = mc^2$ . Поэтому законы сохранения полной массы

$$M = \sum_i m_i$$

и полной энергии

$$E = \sum_i E_i = \sum_i m_i c^2,$$

изолированной физической системы — это в сущности один и тот же закон в том смысле, что один вытекает из другого.

Как нерелятивистский закон  $dm_i/dt = 0$ , так и нерелятивистское выражение для сохранения полной энер-

гии системы заменяются законом сохранения  $dM/dt=0$ , или, что то же самое,  $dE/dt=0$ .

Мы обобщим теперь эти законы на случай неизолированной системы, т. е. такой физической системы, на которую действует результирующая внешняя сила  $\mathbf{F}$ . Для простоты рассмотрим систему, состоящую всего из одного тела, которое движется со скоростью  $\mathbf{v}$ . Тогда в качестве соответствующих этому случаю релятивистских законов мы, естественно, предположим соотношения

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \quad (21.2)$$

и

$$\frac{dE}{dt} = (\mathbf{F}\mathbf{v}). \quad (21.3)$$

Их вид совпадает с видом соответствующих соотношений в теории Ньютона. Физический смысл здесь будет, однако, другим, так как  $\mathbf{p}$  и  $E$  определяются теперь релятивистскими выражениями

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \quad \text{и} \quad E = mc^2,$$

где

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

а не выражениями из теории Ньютона.

Вместе с тем ясно, что для получения уравнений движения, инвариантных по форме во всех лоренцевых системах отсчета (т. е. имеющих один и тот же вид в этих системах), недостаточно дать релятивистские определения величинам  $\mathbf{p}$  и  $E$ . Необходимо еще определить силу  $\mathbf{F}$  таким образом, чтобы она выражала одну и ту же взаимосвязь независимо от скорости движения системы отсчета. Сделать это, однако, невозможно до тех пор, пока мы не конкретизируем выражение для этой силы, взяв, например, силу, вызванную электромагнитным полем, тяготением или ядерными взаимодействиями. Мы будем обсуждать в этой книге только электромагнитные силы и подробно покажем, что они приведут к инвариантным выражениям для уравнений движения. Можно, однако, утверждать, что все виды сил, свойства которых нам известны, можно выразить таким образом,

чтобы они приводили к подобным инвариантным уравнениям движения. Доказательство этого утверждения выходит за рамки настоящей работы<sup>1)</sup>.

Сила, действующая на тело, обладающее зарядом  $q$ , со стороны электрического и магнитного полей, напряженности которых соответственно равны  $\mathfrak{E}$  и  $\mathfrak{H}$ , дается выражением

$$\mathbf{F} = q \left( \mathfrak{E} + \left[ \frac{\mathbf{v}}{c} \mathfrak{H} \right] \right). \quad (21.4)$$

Имея в виду, что

$$(\mathbf{v} [\mathbf{v} \mathfrak{H}]) \equiv 0,$$

легко получить лоренцевские уравнения движения для заряженного тела:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q \left( \mathfrak{E} + \left[ \frac{\mathbf{v}}{c} \mathfrak{H} \right] \right), \quad (21.5)$$

$$\frac{dE}{dt} = q(\mathfrak{E}\mathbf{v}). \quad (21.6)$$

Для наших целей удобнее переписать их в дифференциальной форме, заменив  $\mathbf{v}$  на  $d\mathbf{x}/dt$ :

$$d\mathbf{p} = q \left( \mathfrak{E} dt + \frac{1}{c} [d\mathbf{x} \mathfrak{H}] \right), \quad (21.7)$$

$$dE = q(\mathfrak{E} d\mathbf{x}), \quad (21.8)$$

где  $d\mathbf{x}$  — вектор, на который перемещается тело за промежуток времени  $dt$ .

Впервые приведенные выше законы были найдены для случая систем отсчета, в которых скорость движения электрона  $\mathbf{v}$  была мала по сравнению со скоростью света  $c$ . Нас интересуют здесь, однако, условия выполнения этих законов независимо от скорости движения системы отсчета. Другими словами, пусть уравнения (21.7) и (21.8) справедливы в некоторой системе отсчета  $A$ ; требуется найти, как должны быть связаны новые

<sup>1)</sup> Существуют, правда, такие силы (среди которых следует упомянуть силы, действующие между атомными ядрами), которые остаются пока настолько непонятными, что в этом отношении о них почти ничего нельзя сказать. Тем не менее сейчас нет оснований предполагать, что они могут привести к уравнениям движения, не инвариантным относительно преобразований Лоренца.

величины  $\mathcal{E}'$  и  $\mathcal{H}'$ , наблюдаемые в другой системе отсчета  $B$ , с  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{H}$ , чтобы в системе  $B$  уравнения движения имели тот же вид, что и в  $A$ , когда они выражены в соответствующих новых переменных. Итак, мы приняли

$$d\mathbf{p}' = q \left( \mathcal{E}' dt' + \frac{1}{c} [d\mathbf{x}' \mathcal{H}'] \right) \quad (21.9)$$

и

$$dE' = q (\mathcal{E}' d\mathbf{x}'). \quad (21.10)$$

Выразим  $d\mathbf{p}'$  и  $dE'$  через  $d\mathbf{p}$  и  $dE$  согласно преобразованиям Лоренца (20.7) и (20.8), а  $d\mathbf{x}'$  и  $dt'$  — через  $d\mathbf{x}$  и  $dt$  согласно аналогичным преобразованиям (15.12). Для этого возьмем дифференциалы соответствующих равенств, приняв  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{V}_0$  за постоянные. Используя обозначение

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (V/c)^2}},$$

получим

$$d\mathbf{p} + (\gamma - 1)(\mathbf{V}_0 d\mathbf{p}) \mathbf{V}_0 - \frac{\gamma \mathbf{V}}{c^2} dE = q\gamma \mathcal{E}' \left( dt - \left( \mathbf{V} \frac{d\mathbf{x}}{c^2} \right) \right) + \\ + \frac{q}{c} (\gamma - 1)(\mathbf{V}_0 d\mathbf{x}) [\mathbf{V}_0 \mathcal{H}'] + \frac{q}{c} \gamma dt [\mathbf{V} \mathcal{H}'], \quad (21.11)$$

$$\gamma(dE - \mathbf{V} d\mathbf{p}) = q(\mathcal{E}' d\mathbf{x}) + q(\gamma - 1)(\mathcal{E}' \mathbf{V}_0)(\mathbf{V}_0 d\mathbf{x}) - \\ - q\gamma(\mathcal{E}' \mathbf{V}) dt. \quad (21.12)$$

Подставляя сюда выражения (21.7) и (21.8) для  $dE$  и  $d\mathbf{p}$ , находим

$$d\mathbf{p} + (\gamma - 1)(\mathbf{V}_0 d\mathbf{p}) \mathbf{V}_0 - \frac{\gamma \mathbf{V} dE}{c^2} = q \left( \mathcal{E} dt + \frac{1}{c} [d\mathbf{x} \mathcal{H}] \right) + \\ + q(\gamma - 1) \left\{ (\mathbf{V}_0 \mathcal{E}) dt + \left( \mathbf{V}_0 \frac{1}{c} [d\mathbf{x} \mathcal{H}] \right) \right\} \mathbf{V}_0 - \frac{\gamma}{c^2} \mathbf{V} (\mathcal{E} d\mathbf{x}), \quad (21.13)$$

$$\gamma(dE - (\mathbf{V} d\mathbf{p})) = q\gamma \left\{ (\mathcal{E} d\mathbf{x}) - (\mathbf{V} \mathcal{E}) dt - \left( \frac{\mathbf{V}}{c} [d\mathbf{x} \mathcal{H}] \right) \right\}. \quad (21.14)$$

Учитывая тождество

$$(\mathbf{V} [d\mathbf{x} \mathcal{H}]) \equiv -([\mathbf{V} \mathcal{H}] d\mathbf{x}),$$

легко привести комбинацию уравнений (21.11) и (21.12) к виду

$$\left( \left\{ \mathcal{E}' + (\gamma - 1)(\mathcal{E}'\mathbf{V}_0)\mathbf{V}_0 - \gamma\mathcal{E} + \gamma \left[ \frac{\mathbf{V}}{c} \mathcal{H} \right] \right\} dx \right) - \\ - \gamma((\mathcal{E}' - \mathcal{E})\mathbf{V}) dt = 0. \quad (21.15)$$

Полученное соотношение должно быть справедливым при любых скоростях частицы  $\mathbf{v} = d\mathbf{x}/dt$ , так что оно не должно зависеть от выбора  $d\mathbf{x}$  и  $dt$ . Читатель без труда проверит, что это возможно лишь в том случае, когда коэффициенты при  $d\mathbf{x}$  и  $dt$  по отдельности обращаются в нуль, т. е. когда

$$((\mathcal{E}' - \mathcal{E})\mathbf{V}) = 0,$$

$$\mathcal{E}' - \gamma\mathcal{E} - (\mathcal{E}'\mathbf{V}_0)\mathbf{V}_0 + \gamma(\mathcal{E}'\mathbf{V}_0)\mathbf{V}_0 + \gamma \left[ \frac{\mathbf{V}}{c} \mathcal{H} \right] = 0. \quad (21.16)$$

Удобнее выразить векторы напряженностей  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{H}$ ,  $\mathcal{E}'$  и  $\mathcal{H}'$  через их компоненты  $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}'_1$  и  $\mathcal{H}_1$ ,  $\mathcal{H}'_1$ , параллельные вектору  $\mathbf{V}$ , и  $\mathcal{E}_2$ ,  $\mathcal{E}'_2$  и  $\mathcal{H}_2$ ,  $\mathcal{H}'_2$ , перпендикулярные  $\mathbf{V}$ . Из равенства

$$((\mathcal{E}' - \mathcal{E})\mathbf{V}) = 0$$

следует, что

$$\mathcal{E}'_1 = \mathcal{E}_1.$$

С другой стороны, поскольку

$$\mathcal{E}'_1 - (\mathcal{E}'_1\mathbf{V}_0)\mathbf{V}_0 = 0$$

и

$$(\mathcal{E}'_2\mathbf{V}_0) = 0,$$

а также в силу того, что

$$(\mathcal{E}'_1\mathbf{V}_0) = \mathcal{E}'_1\mathbf{V}_0$$

и

$$\mathcal{E}_1 = (\mathcal{E}_1\mathbf{V}_0)\mathbf{V}_0,$$

получаем

$$\mathcal{E}'_2 = \gamma \left\{ \mathcal{E}_2 + \left[ \frac{\mathbf{V}}{c} \mathcal{H}_2 \right] \right\}. \quad (21.17)$$

Поступая подобным же образом с уравнениями (21.11) и (21.13), читатель может проверить выполнение следующих соотношений:

$$\mathcal{H}'_1 = \mathcal{H}_1 \quad (21.18)$$

и

$$\mathcal{H}'_2 = \gamma \left\{ \mathcal{H}_2 - \left[ \frac{\mathbf{V}}{c} \boldsymbol{\varepsilon}_2 \right] \right\}. \quad (21.19)$$

Все эти соотношения можно свести к следующим двум выражениям для  $\boldsymbol{\varepsilon}'$  и  $\mathcal{H}'$ :

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = (\boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{V}_0) \mathbf{V}_0 + \gamma \left\{ \boldsymbol{\varepsilon} - (\mathbf{V}_0 \boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{V}_0 + \left[ \frac{\mathbf{V}}{c} \mathcal{H} \right] \right\}; \quad (21.20)$$

$$\mathcal{H}' = (\mathcal{H} \mathbf{V}_0) \mathbf{V}_0 + \gamma \left\{ \mathcal{H} - (\mathbf{V}_0 \mathcal{H}) \mathbf{V}_0 - \left[ \frac{\mathbf{V}}{c} \boldsymbol{\varepsilon} \right] \right\}. \quad (21.21)$$

Эти законы преобразования для  $\boldsymbol{\varepsilon}$  и  $\mathcal{H}$  гарантируют сохранение инвариантного вида уравнений движения заряженных частиц (21.7) и (21.10) независимо от скорости системы отсчета.

Нужно отметить, что законы преобразования (21.20) и (21.21) обеспечивают также инвариантную форму для уравнений Максвелла<sup>1)</sup>. Итак, мы пришли к выводу, что и законы электродинамики (уравнения Максвелла), и законы движения заряженных частиц в электромагнитном поле можно записать в инвариантной форме (т. е. с помощью систем уравнений, вид которых одинаков во всех системах отсчета, связанных между собой преобразованиями Лоренца).

Нужно сказать, наконец, что законы преобразования для  $\boldsymbol{\varepsilon}$  и  $\mathcal{H}$  приводят к выводам, которых следовало ожидать на основании законов электродинамики. Например, из закона индукции Фарадея следует, что когда контур пересекает магнитное поле  $\mathcal{H}$  со скоростью  $\mathbf{V}$ , то в нем индуцируется э. д. с., пропорциональная абсолютным величинам скорости  $\mathbf{V}$  и напряженности

<sup>1)</sup> Доказательства этого утверждения выходят за рамки настоящей работы, и мы отсылаем читателя за подробностями к следующим книгам: С. Møller, *The Theory of Relativity*, Oxford, 1952; W. Panofsky, M. Phillips, *Classical Electricity and Magnetism*, New York, 1955 (имеется перевод: В. Пановский, М. Флишс, *Классическая электродинамика*, М., 1963. — Ред.)



магнитного поля  $\mathcal{H}$  и перпендикулярная этим векторам. Из уравнений (21.20) и (21.21) по существу следует тот же результат. Так, если в системе отсчета  $A$  имеем  $\mathcal{E}=0$  и  $\mathcal{H}\neq 0$ , то при переходе к системе  $B$  (движущейся относительно  $A$  со скоростью  $\mathbf{V}$ ), в которой контур покоится, получим

$$\mathcal{E}' = \gamma \left[ \frac{\mathbf{V}}{c} \mathcal{H} \right].$$

Тогда э. д. с., обнаруживаемая в той системе, где контур покоится, будет пропорциональна  $\mathcal{E}'$ .

Аналогично если в системе отсчета  $A$  имеем  $\mathcal{H}=0$ , и  $\mathcal{E}\neq 0$ , то из уравнений (21.18) и (21.19) следует, что в системе, движущейся относительно  $A$  со скоростью  $\mathbf{V}$ , появится магнитное поле с напряженностью

$$\mathcal{H}' = -\gamma \left[ \frac{\mathbf{V}}{c} \mathcal{E} \right].$$

Можно показать, что этот результат эквивалентен появлению максвелловского «тока смещения»

$$\mathbf{j}_d = \frac{c}{4\pi} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t}.$$

Это значит, что объект, движущийся в статическом электрическом поле, будет испытывать в той системе отсчета, где он покоится, воздействие соответствующего магнитного поля (это можно заметить, если взять, например, магнитный диполь; он будет стремиться ориентироваться по направлению этого «индуцированного» магнитного поля).

## *Экспериментальное подтверждение специальной теории относительности*

Мы сделаем здесь краткий обзор экспериментальных фактов, подтверждающих специальную теорию относительности. При этом нужно помнить, что специальная теория относительности существенно опирается на следующие два положения.

1. *Принцип относительности* утверждает, что законы физики всегда выражаются соотношениями одного и того же вида независимо от скорости движения системы отсчета.

2. Любые две системы отсчета, движущиеся с разными, но постоянными скоростями, связаны между собой преобразованиями Лоренца.

Экспериментальные факты, подтверждающие принцип относительности, поистине ошеломляющи в том смысле, что никто и никогда не смог обнаружить какую-либо зависимость вида физических законов от скорости движения системы отсчета. Поэтому мы ограничимся здесь обсуждением фактов, подтверждающих справедливость преобразования Лоренца.

При обсуждении теории эфира (см. гл. 9) мы видели, что преобразования Лоренца полностью эквивалентны совокупности следующих трех эффектов:

а) лоренцеву сокращению движущегося объекта, пропорциональному  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ;

б) замедлению хода поступательно движущихся часов, пропорциональному  $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ;

в) расхождению в показаниях двух эквивалентных движущихся на расстоянии  $x$  друг от друга часов на величину  $\Delta t = \frac{(vx)}{c^2} / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ .

Последнее означает, конечно, что двое движущихся часов при удалении друг от друга перестают показывать одно и то же время, даже если они были строго синхронизованы, когда находились вместе.

В гл. 6 было показано, что опыт Майкельсона — Морли можно рассматривать как блестящее подтверждение лоренцева сокращения. Более поздние и очень точные измерения скорости света с помощью усовершенствованного метода Физо, обсуждавшегося в гл. 7, основываются на сочетании лоренцева сокращения и изменения хода часов. Поскольку лоренцево сокращение уже подтверждено опытом Майкельсона — Морли, можно говорить, что метод Физо подтверждает факт изменения хода часов в зависимости от их скорости, как это предсказывается преобразованиями Лоренца. Впрочем, имеется и более непосредственное доказательство такого изменения хода часов. Так, в гл. 16 мы говорили о наблюдении среднего времени жизни быстро движущихся мезонов и об изменении частоты света (эффект Доплера), наблюдаемом перпендикулярно направлению движения источника света. Оба эти эффекта дают весьма точное подтверждение выводам из преобразований Лоренца относительно увеличения наблюдаемого периода движущихся часов.

Значительно труднее получить прямое опытное подтверждение третьего предсказания теории, касающегося относительности одновременности, обсуждавшейся на примере движущихся на некотором расстоянии друг от друга часов. На первый взгляд казалось бы, что этот эффект можно проверить, рассматривая релятивистский закон сложения скоростей (15.7) и (15.8), вывод которого опирается на формулу (15.6), как раз выражающую рассинхронизацию таких часов. Этот закон был вполне точно подтвержден, например, при измерении скорости света в движущейся воде (см. гл. 17). К сожалению, интерпретация этого результата неоднозначна, ибо можно показать<sup>1)</sup>, что перерелятивистскую теорию электромагнитных явлений можно сформулировать так,

---

<sup>1)</sup> См., например, книгу Мёллера (C. Möller, *The Theory of Relativity*, Oxford, 1952).

чтобы из нее вытекали те же результаты, что и из релятивистской теории, и с той степенью точности, какую допускает современный эксперимент. Поэтому согласно между результатами измерений скорости света в движущейся воде и предсказанием теории относительности не доказывает *убедительно*, что формулы для синхронизации движущихся часов правильны, так как другие предположения, связанные с электромагнитными явлениями, могли бы привести в сущности к тем же результатам.

Другой подход к этой проблеме, дающий практически убедительное подтверждение этого эффекта, можно найти, если еще раз по-иному рассмотреть результаты гл. 8. При выводе соотношения (8.8) мы показали тогда, что если принять формулу для замедления хода часов

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

то из нее с необходимостью будет следовать, что если двое синхронно идущих вначале часов удалить друг от друга (медленно, без толчков и без ускорений), синхронность их нарушится и между их показаниями появится расхождение на величину

$$\frac{I_0 v/c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Этот вывод как раз и является следствием того факта, что при удалении друг от друга часы должны начать показывать разное время. *Совершенно очевидно, что этот вывод не зависит от использования гипотезы эфира.* Так как формула

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

уже была подтверждена на опыте, то основанное на преобразовании Лоренца утверждение о том, что эквивалентные часы обнаружат расхождение в показаниях на

$$\frac{I_0 v/c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

может считаться по существу проверенным.

Более непосредственный способ проверки этого утверждения был уже предложен в конце гл. 10. Согласно ему, следует измерить скорость света на отрезке между двумя точками  $A$  и  $B$ , который свет проходит за промежуток времени  $t_A - t_B$ . Моменты  $t_A$  и  $t_B$  должны быть при этом отсчитаны по эквивалентным друг другу цезиевым часам, которые до этого были совместно синхронизованы, а затем транспортированы в точки  $A$  и  $B$ . Возможно, что этот опыт скоро станет технически выполнимым. Однако, как было указано в гл. 10, нет оснований предполагать, что результаты этого опыта будут отличаться от предсказываемых с помощью преобразований Лоренца.

Предсказания теории Эйнштейна относительно эквивалентности массы и энергии имеют столь солидное подтверждение, что нет необходимости их обсуждать. Точно так же в исследованиях столкновений частиц весьма высокой энергии, как получаемых искусственно в ускорителях, так и встречающихся в космических лучах, хорошо подтвердились соотношения (20.4) — (20.6), выражающие лоренцево преобразование для энергии и импульса.

Подобным же образом была проверена инвариантность уравнений движения (21.2) и (21.3) для заряженной частицы (с силой Лоренца) даже в том случае, когда отношение  $v/c$  близко к единице; отличное экспериментальное подтверждение нашли также законы преобразования (21.20) и (21.21) для напряженностей электрического и магнитного полей.

Экспериментальные факты, которые мы привели в качестве подтверждения специальной теории относительности, представляются весьма убедительными. Кроме них, имеется еще множество других подтверждений, которые мы здесь не обсуждали. К тому же следует помнить, что значительная часть этих фактов была получена (особенно на раннем этапе развития теории относительности, когда она еще не добилась всеобщего признания) на основании экспериментов, предназначенных в лучшем случае для проверки этой теории, а то и в целях ее опровержения. Имея в виду, что она так успешно выдержала все такие проверки и критику,

а также привела к целому ряду новых, часто неожиданных результатов, можно сказать, что теория относительности стоит теперь на столь же прочной основе, что и все остальные разделы современной физики.

Тем не менее теорию относительности, да и любую другую научную теорию нельзя рассматривать как раз и навсегда установленную истину, в которой нельзя сомневаться и которая никогда не окажется в каких-нибудь отношениях неверной. Всякая теория является приближенным отражением действительности и по ряду причин обладает ограниченной применимостью. Например, в настоящее время значительное число ученых склонно думать, что теория относительности (как специальная, так и общая) может быть неверна в приложении к случаю очень малых расстояний (намного меньших предполагаемых размеров «элементарных» частиц). Кроме того, по-видимому, есть основания предполагать, что теория относительности может быть неприменима к чрезвычайно большим областям пространства порядка предполагаемых «размеров» Вселенной (вплоть до областей, где «красное смещение» становится существенным). Теория относительности может оказаться несостоятельной также в ряде других отношений. Поэтому, особенно когда мы сталкиваемся с новыми областями явлений, теорию относительности следует применять с осторожностью и быть готовыми к ее критическому пересмотру, а при необходимости и к замене ее более точной теорией, которая может столь же радикально отличаться от теории относительности, как сама теория относительности отличается от механики Ньютона.

---

*Еще об эквивалентности  
массы и энергии*

Вытекающая из теории относительности эквивалентность массы и энергии настолько противоречит старым классическим представлениям, что кажется целесообразным подробнее обсудить общие следствия из нее. К тому же опыт преподавания показывает, что студенты часто сталкиваются с большими трудностями при глубоком изучении эйнштейновских понятий массы и энергии. У них возникают вопросы типа: значит, масса то же самое, что и энергия?, состоит ли мир из одной только энергии?, что есть масса, если ее можно превратить в энергию, и наоборот? и, наконец, что такое *энергия*?

Начнем с выяснения того, откуда происходят обычные представления о телах с определенной и неизменной массой. Очевидно, эти представления основываются на наблюдении, что мир состоит из большого числа предметов и сущностей, которые можно сравнивать по их размерам, форме, весу и т. д. и которые можно рассматривать как состоящие из определенных количеств или массы некоторых веществ, например камня, земли, воды, металла, дерева и т. д. Конечно, оказывается, что эти предметы изнашиваются, ломаются, плавятся, подвергаются коррозии, распадаются, испаряются или сгорают так, что при этом остаются только газы. Ясно, таким образом, что они фактически сами по себе не неизменны и масса их не постоянна, хотя их видимые свойства могут не испытывать заметных изменений за малый или большой промежуток времени.

Однако в процессе мышления мы почему-то считаем, что должна существовать какая-то абсолютно неизменная основа для всего сущего.

Например, на раннем этапе развития науки ученые предполагали, что атомы являются абсолютно неизменными сущностями, простейшими «кирпичиками» мироздания, так что постоянно изменяющийся характер вещества в больших масштабах считался не чем иным, как следствием движений лежащих в основе всего неизменных атомов. Затем было обнаружено, что сами атомы обладают переменной структурой, поскольку они состоят из «элементарных частиц» (электронов, протонов и нейтронов). Таким образом, атомы могут изменяться, превращаясь в другие атомы, достраиваясь или распадаясь на части и т. д. Но при этом предполагалось, что все же существует нечто абсолютно неизменное — элементарные частицы. Однако, как мы знаем, были открыты ядерные и другие процессы, при которых эти частицы превращаются друг в друга, рождаются и взаимно аннигилируют, причем выделяется или поглощается соответствующее количество энергии. Таким образом, вновь потерпели провал поиски абсолютно неизменных сущностей и веществ. Более того, стало ясно, что как в нашем жизненном опыте, так и при научных исследованиях реально воспринимаемые и наблюдаемые нами предметы, сущности, вещества и т. д. всегда (насколько мы знаем) проявляют лишь *относительную неизменность* своих свойств, и эту относительную неизменность часто по ошибке принимают за абсолютную.

Если человечество не встречало никогда ничего абсолютно неизменного, то спрашивается, как могла возникнуть эта идея — идея чрезвычайно стойкая, к которой мы неизменно возвращаемся, несмотря на все новые опыты и наблюдения, снова и снова показывающие ее несовместимость с известными нам фактами? В этот вопрос можно внести некоторую ясность, рассмотрев проблему развития понятия объекта у людей в младенческом и детском возрасте. (Исследование этой проблемы было проведено в ходе анализа развития представлений о пространстве и времени у человека как личности и более подробно обсуждается в приложении.) Установлено, что у очень маленьких детей, по-видимому, на самом деле отсутствует понятие неизменного объекта. Более того, их отношение к объектам таково, как если



бы эти последние начинали свое существование, когда были впервые замечены, и прекращали существовать при выходе из поля восприятия. У ребенка лишь постепенно складываются представления об объекте, существующем, даже когда ребенок его не воспринимает. Понятие постоянного количества вещества развивается еще позднее, и даже трех- или четырехлетние дети часто совершенно не разбираются в этом вопросе. Но с течением времени эти представления формируются и постепенно входят в привычку, так что мы начинаем непроизвольно при любых обстоятельствах выделять тела, сущности или субстанции с фиксированными характеристиками. Мы начинаем даже чувствовать, что не способны представить себе мир, который не был бы построен из неизменных сущностей или веществ того или иного рода.

Представление о том, что должны существовать какие-то абсолютно неизменные сущности, основывается не только на привычке мыслить определенным образом, появляющейся в раннем детстве. Подобно аналогичным представлениям об абсолютном пространстве и времени, оно возникает также, по крайней мере частично, в структуре нашего разговорного языка. Увидев нечто, обладающее *относительно неизменными* свойствами, мы даем ему название. Это название остается, однако, тем же, даже если наш объект изменяется. Ввиду сохранения названия мы склонны думать о нем теперь как о прежнем предмете. Самым ярким примером может служить сам человек. Ведь каждый продолжает носить одно и то же имя, которое он носил и 10, и 20, и 30 лет назад. Но ведь очевидно, что это совсем другое лицо как в физическом, так и в умственном отношении. Фактически оно сейчас уже другое, чем было вчера или даже минуту назад. В подобном же процессе постоянного изменения находится и слиток металла — его атомы движутся, он окисляется, устает и т. д. В определенных пределах и для коротких интервалов времени такими изменениями можно пренебречь. Итак, неизменность названия объекта дает адекватное представление о нем лишь в определенных узких границах. Источником наших трудностей является привычка, уходящая своими корнями в эпоху,

когда человечество только начинало пользоваться языком (и равным образом в соответствующий период детства каждого из нас). Мы отождествляем вещи, т. е. бессознательно принимаем, что все, носящее одно и то же название, — это, по меньшей мере, по своей сути одна и та же вещь.

Вернемся теперь к проблеме массы и энергии в физике. Термин «масса» был дан определенным свойствам, наблюдаемым на опыте. В физике эти свойства приобрели более точный смысл. Масса, понимаемая в обыденной жизни как «неизменное количество вещества», соответствует в физике двум более точно определенным свойствам. Одним из них является инертность, т. е. способность тел сопротивляться ускорению, а другим — гравитация.

Рассмотрим сначала *инертный аспект* понятия массы. Уравнение Ньютона  $ma = F$  показывает, что сила, требующаяся для сообщения телу определенного ускорения, пропорциональна массе тела. Смысл этой массы не совпадал бы с обычно принятым, если бы она не была постоянной. Иными словами, уравнения Ньютона (18.1) и (18.2) не образуют полной системы, если к ним не добавить уравнения (18.3), т. е.  $dm/dt = 0$ , или  $m = \text{const}$ . Часто забывают о важной роли этого последнего уравнения именно из-за нашей обыденной привычки думать о массе как о «неизменном» свойстве вещества. В действительности факт постоянства коэффициента пропорциональности  $m$  между силой и ускорением данного объекта следует не из житейских *представлений* о массе. Наблюдения подтверждают, что этот коэффициент пропорциональности является *неизменным* при всех опытах, проводимых в области применимости механики Ньютона.

Вторым важным проявлением массы объекта в физике является ее присутствие в качестве постоянного коэффициента пропорциональности в законе тяготения, действующего между данным объектом и некоторым другим:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Здесь  $r$  — расстояние между объектами, а  $G$  — гравитационная постоянная. При этом важно еще отметить, что

из всех экспериментов, доступных в настоящее время, следует пропорциональность массы, фигурирующей в этом законе, инертной массе, стоящей в уравнениях движения. Ввиду постоянства отношения гравитационной и инертной масс возникла тенденция их отождествлять, т. е. им было дано одно и то же название, и поэтому их склонны были рассматривать как одно и то же. При этом мы, вероятно бессознательно, заменяем точный физический смысл гравитационной и инертной масс обыденным понятием массы как «неизменного количества вещества».

Мы нашли в релятивистской области (см. гл. 20), когда отношение  $v/c$  близко к единице, что законы движения Ньютона следует заменить законами Эйнштейна:

$$\frac{dp}{dt} = F, \quad \text{где} \quad p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = mv.$$

Таким образом, масса в этой более широкой области уже не является неизменной. Следовательно, ясно, что масса фактически является *относительно неизменной* в том смысле, что ее изменениями можно пренебречь лишь в области применимости теории Ньютона.

Гравитационный аспект понятия массы невозможно рассматривать в специальной теории относительности, он требует привлечения общей теории. Здесь достаточно кратко упомянуть о том, что в общей теории относительности Эйнштейна строгая пропорциональность гравитационной и инертной масс, неизменно подтверждаемая опытом, рассматривается как указание на то, что оба эти вида массы отражают разные, но взаимно связанные аспекты некоторого единого, более широкого круга понятий и законов, из которых вытекают *как* свойства инерции, *так* и законы тяготения. Это представление и было положено Эйнштейном в основу его «принципа эквивалентности» влияния ускорения системы отсчета и влияния гравитационного поля. Здесь понятие эквивалентности имеет смысл, аналогичный смыслу «эквивалентности» массы и энергии, т. е. оно относится к глубокой взаимосвязи между двумя разными величинами, заключающейся в том, что одна из величин должна быть

пропорциональна другой. Исходя из этого предположения, Эйнштейну удалось развить стройную и единую теорию — общую теорию относительности, в которой гравитационная и инертная массы рассматриваются как разные аспекты единого физического процесса. Таким образом, специальная теория относительности оказалась частным и приближенным предельным случаем общей, более или менее напоминая положение механики Ньютона как соответствующего предельного и приближенного случая специальной теории относительности.

Из сказанного ясно, что мы употребляем одно и то же слово «масса», говоря о совершенно разных свойствах, когда мы выходим за рамки области применимости теории Ньютона. Действительно, так как в релятивистской области масса тела не является неизменной, релятивистское понятие массы находится в противоречии с обыденным понятием массы как «неизменного количества вещества». Это обыденное понятие имеет разумный смысл лишь в области применимости теории Ньютона; следовательно, понятие «массы», используемое в теории относительности, не может соответствовать его обыденному значению. А именно в теории относительности под массой понимают главным образом некий коэффициент пропорциональности, фигурирующий в законах инерции и гравитации.

В связи с этим полезно вспомнить, что в любом случае обыденное представление о массе не является единственно возможным; оно сформировалось в ходе развития человечества и усвоено нами еще в детстве в такой мере, что вошло в привычку и кажется поэтому совершенно неизбежным и не подлежащим изменению. Как и в случае обыденных представлений о пространстве и времени, эта привычка мышления оказывается адекватной лишь в определенных границах. Важно, однако, суметь отказаться от этой привычки при выходе за рамки тех явлений, для которых она еще разумна.

Рассмотрим теперь смысл понятия энергии. Первоначально энергия определялась в физике как «количество движения». Это привело, однако, к горячим спорам на заре развития науки о том, что есть «истинное» количество движения — энергия или импульс. Позднее

выяснилось, что весь этот спор был беспредметным, так как единого понятия «количество движения» не существует. Более того, как энергия, так и импульс являются *сохраняющимися величинами* в том смысле, что полные их значения (просуммированные по всем составным частям рассматриваемой изолированной физической системы) не изменяются с течением времени.

При взаимодействии разных частей системы друг с другом между ними происходит обмен энергией и импульсом. При этом соответствующие полные значения сохраняются, однако энергия и импульс каждой из частей, конечно, претерпевают изменения. Одно уже это обстоятельство говорит о том, что полная энергия системы является величиной только *относительно неизменной*, и ее постоянство имеет место лишь тогда, когда рассматриваемая система изолирована и не вступает во взаимодействие со своим окружением.

Взаимодействия не ограничиваются одними лишь механическими обмeнами, к ним относятся также превращения разных видов энергии друг в друга. Например, механическая энергия может перейти в соответствующее количество электрической энергии, и наоборот; подобным же образом оба эти вида энергии могут переходить в эквивалентные им количества теплоты, и наоборот (последняя представляет собой энергию хаотического движения молекул — движения, которое перестает быть явно заметным, когда мы рассматриваем физическую систему на макроскопическом уровне). Такая способность превращения друг в друга взаимно эквивалентных количеств различных видов энергии является, безусловно, наиболее характерным физическим свойством энергии.

Так как полная энергия изолированной физической системы сохраняется, возникает тенденция вообще представлять энергию как некую *неизменную субстанцию*, подобную жидкости, перетекающей из одной части системы в другую. Но никто никогда и ни при каких обстоятельствах не наблюдал такой «жидкости». К тому же энергия всегда проявляет себя при движении как *относительно неизменная функция*. Таким образом, в случае

изолированного тела «инвариантом»<sup>1)</sup> является функция  $mv^2/2$  в том смысле, что она остается постоянной, пока данное тело изолировано, и что в системе таких тел, взаимодействующих друг с другом, остается постоянной сумма энергий этих тел (в то время как, например, функция  $m^2v^5/2$  не обладает подобными свойствами). Аналогичным образом протекающий через катушку с индуктивностью  $L$  электрический ток  $I$  обладает энергией  $LI^2/2$ , сохраняющейся в отсутствие сопротивления. Эта энергия может быть превращена в соответствующее количество механической энергии с помощью мотора или в соответствующее количество тепловой энергии с помощью сопротивления. Здесь мы подчеркнем, что энергия, хотя и обладает способностью превращаться из одного вида в другой, *всегда* является неизменной характеристикой или функцией некоторого вида движения и никогда не выступает в виде независимо существующей субстанции. Потенциальная энергия даже определяется как способность совершать работу, т. е. производить соответствующее движение, выражаемое через механическую, электрическую, тепловую или иную форму энергии.

На ранних этапах развития физики в принципе можно было еще представлять себе любое движение как некоторое качество или свойство каких-то частиц. Когда же было сделано открытие, что масса (и даже сами частицы) может «аннигилировать» и при этом освобождается эквивалентное количество энергии, эти представления оказались несостоятельными. Но если энергия уже не является свойством частиц, то как ее следует понимать? Что теперь могут означать понятия «энергия» и «движение», если энергия, например, оказалась всего лишь относительно неизменной характеристикой движения и если во Вселенной не существует никаких фундаментальных и неизменных носителей этого движения?

<sup>1)</sup> По-английски «invariant» означает и «инвариант», и «неизменный». В переводе используется как первый, так и второй термин в зависимости от контекста. В данном случае, как поясняет сам автор, он говорит о законе сохранения (неизменности), а не о какой-либо инвариантности при преобразовании координат. — Прим. перев.

Чтобы ответить на эти вопросы, мы сначала проведем различие между двумя видами энергии. С одной стороны, существует *энергия внешнего движения*, происходящего в крупных масштабах, когда, например, тело изменяет свое положение или ориентацию как целое. С другой стороны, существует *энергия внутреннего движения*, например теплового движения составляющих тело молекул, которое само по себе незаметно в крупных масштабах. Для внутреннего движения характерно, что оно обычно совершается в виде колебаний, когда движение в одну сторону сменяется движением в противоположную сторону (нечто подобное отражению) и т. д. В уже рассмотренном нами эйнштейновском примере с ящиком, заполненным излучением, последовательно отражающийся свет можно рассматривать как внутреннее движение.

Очевидно, понятия «внешний» и «внутренний» — чисто относительные по своему смыслу. Так, молекулярные движения, если их рассматривать в крупных масштабах, нужно отнести к «внутренним», так как в своей сумме они в этих масштабах взаимно уничтожаются. На молекулярном же уровне эти движения оказываются «внешними», так как молекулы изменяют свое пространственное положение заметным на *этом уровне* образом. Однако на том же молекулярном уровне движения электронов и ядер еще остаются «внутренними», хотя на более глубоких уровнях нам придется говорить о них как о «внешних», когда *эти* движения станут приводить к заметным перемещениям в пространстве.

Имея в виду эти замечания, вернемся теперь к вопросу: *что такое масса?* Отметим прежде всего, что в теории Эйнштейна масса и энергия не рассматриваются как *в корне различные понятия*. Более того, там они считаются двумя разными, но взаимно связанными сторонами единого общего процесса движения. В таком движении проявляется относительно неизменная способность совершать работу, осуществлять взаимодействие с другими системами и приводить эти системы в движение за счет движения исходной системы. Тогда мы и говорим об *энергии*. Кроме того, рассматриваемая система обладает определенной инертностью, т. е. способ-

ностью сопротивляться ускорению, равно как и определенным гравитационным притяжением к другим телам. Оба эти свойства определяются той величиной, которую называют «массой». Однако мы уже видели, что внутреннее движение тела (пусть это будет хаотическое движение молекул или движение света, отражающегося между стенками) дает вклад в инертную массу тела, равный  $\Delta m$  и определяемый по закону  $\Delta m = \Delta E/c^2$ , где  $\Delta E$  — энергия, связанная с этим движением. Более того, как мы уже упоминали, Эйнштейн показал в своей общей теории относительности, что *эта энергия вносит вклад в гравитационную массу тела*, определяемый этим же законом. Так как теория относительности в любом случае требует отказа от представлений о массе как о «неизменном количестве вещества», то тем самым она утверждает, что если физическая система приобретает (в некоторой форме) добавок энергии  $\Delta E$  к ее полной величине  $E$ , то это *во всех отношениях* отвечает тому, что данная система приобретает и соответствующий добавок массы  $\Delta m = \Delta E/c^2$  (как инертной, так и гравитационной), которая будет частью полной массы  $m = E/c^2$ .

В связи с этим нужно сказать, что *все виды энергии* (как кинетической, так и потенциальной) равным образом дают вклад в массу. Однако «энергия покоя» тела играет особую роль, так как, даже если тело в целом и не совершает видимого движения, в нем все же протекают движения внутренние (излучения, перемещения молекул, электронов, ядер и пр.). Из этих внутренних движений складывается некоторая «энергия покоя»  $E_0$ , которой и соответствует «масса покоя»  $m_0 = E_0/c^2$ . Пока эта энергия остается «внутренней», масса покоя, конечно, не изменяется. Если же на молекулярном, атомном или ядерном уровне происходят внутренние изменения, то, как мы уже видели, при этом могут измениться и «внутренние» колебательные движения, и часть их может перейти во «внешние» движения, заметные в более крупных масштабах. Когда это происходит, соответственно уменьшается «энергия покоя», а вместе с ней и «масса покоя». Мы видим, однако, что такое изменение массы несколько не удивительно, если помнить, что



инертная и гравитационная массы — это всего лишь один аспект единого процесса движения, другим аспектом которого является эквивалентное количество энергии, понимаемой как возможность совершения работы в крупных масштабах. Иначе говоря, превращение «вещества» в «энергию» — это лишь переход от одной формы движения (внутренней, хаотической, колебательной) к другой его форме (например, к поступательному движению в пространстве).

Здесь особенно поучительно разобраться в том, как с этой точки зрения следует понимать возможность существования объектов с равной нулю массой покоя, т. е. движущихся со скоростью света. Если считать, что масса покоя целиком обязана «внутренним» движениям, совершающимся, даже когда тело, видимо, покоится (при рассмотрении его на определенном уровне), то следует признать, что объект, не имеющий «массы покоя», лишен внутренних движений и может обладать *лишь* внешними движениями в том смысле, что ему свойственно лишь перемещение в пространстве. Тогда свет (а также все, что движется с этой скоростью) может рассматриваться как нечто, в принципе не способное находиться в состоянии «покоя» ни на каком уровне вообще ввиду полного отсутствия у него внутренних движений. Следовательно, свет может существовать лишь в форме «внешнего движения» со скоростью  $c$ . Вспомним в связи с этим, что движение со скоростью света инвариантно относительно преобразований Лоренца, так что чисто «внешний» характер движения при этом не связан с выбором системы отсчета наблюдателя. (Напротив, от движения со скоростью, меньшей  $c$ , всегда можно перейти к состоянию покоя, выбрав систему отсчета, движущуюся с той же скоростью, что и рассматриваемый объект.)

---

*На пороге новой теории  
элементарных частиц*

Последовательно развивая сформулированный в предыдущей главе подход, касающийся превращений «энергии покоя» в другие виды энергии и обратно, мы в конце концов придем к пониманию так называемых «элементарных» частиц как структур, возникающих в относительно инвариантных формах движения, происходящего на еще более низком уровне, чем тот, на котором мы наблюдаем эти частицы. В таких структурах даже «энергия покоя» элементарной частицы могла бы рассматриваться как некоторый вид «внутреннего» колебательного движения на уровне, лежащем еще ниже, чем тот, на котором имеют место ядерные превращения.

В настоящее время исследование структуры «элементарных» частиц, безусловно, является одним из важнейших разделов физического исследования. Уже накопилось множество свидетельств того, что на самом деле существует новый уровень масштабов типа упоминавшегося выше, на котором можно надеяться в конце концов понять эту структуру. Однако представляется вероятным, что на этом уровне физические законы будут так же радикально отличаться от законов, известных для ядерного и атомного уровней, как эти последние отличаются от законов макромира. Современное положение в физике элементарных частиц можно, вероятно, сравнить с положением, существовавшим в атомной физике перед появлением знаменитых работ Нильса Бора в том смысле, что тогда был уже собран и систематизирован основной фактический материал, наталкивающий на необходимость введения совершенно новых теоретических

представлений, но эти последние еще не были высказаны. Тем не менее уже ясно, что «рождению» частицы должно соответствовать установление некоторого специфического относительно неизменного движения на уровне ниже уровня элементарных частиц, для чего требуется затрата определенного количества энергии. В свою очередь «аннигиляция» частицы должна соответствовать прекращению этого специфического движения и высвобождению соответствующего количества энергии. При этом существенно, что нужно отбросить представление об «элементарных» частицах как о неизменных материальных образованиях и начать рассматривать их лишь как *относительно* устойчивые сущности, появляющиеся при установлении определенных видов движения и исчезающие, когда эти движения прекращаются.

Здесь, естественно, возникает вопрос: не можем ли мы найти ниже уровня элементарных частиц нового вида сущностей, которые фактически представляли бы собой неизменные материальные образования? Безусловно, в настоящее время мы не можем знать, что будет обнаружено при дальнейшем исследовании этой проблемы. Однако здесь поучительно сделать несколько замечаний, которые следуют из анализа уже известных фактов. Эти замечания, естественно, носят довольно умозрительный характер, но можно надеяться, что они внесут некоторую ясность в рассматриваемую проблему.

Мы начнем со следующего вопроса: оказывает ли когда-либо предположение об абсолютной неизменности объектов или сущностей реальную помощь в установлении законов физики или оно является источником недоразумений, подобно эпициклам Птолемея или теории эфира, так что в нем фактически нет необходимости? Чтобы уяснить глубину этого вопроса, мы прежде всего обратимся к фактам нашей обыденной жизни, где, как показывают наши непрерывно изменяющиеся непосредственные восприятия, имеется возможность абстрагировать некоторые объекты, сущности и т. д., обладающие более или менее устойчивыми характеристиками, например формой, размером, твердостью и другими качествами. Но если мы знаем, что все эти предметы под-

вержены коррозии, плавлению, могут быть сломаны, сожжены, способны распадаться, — разве в этом случае не лучше говорить о них как об *относительно неизменных и устойчивых*, а не как о сущностях с абсолютно неизменными свойствами? На самом деле, ведь тогда мы сможем думать об их разнообразных движениях и превращениях, как внешних, так и внутренних, и в этом не будет никакого противоречия с упомянутыми выше фактами, раз мы отказались от ошибочного представления о том, что, получив определенное название, объект должен всегда оставаться в своей сущности неизменным. Поэтому очевидно, что на уровне обыденного опыта можно добиться большей ясности и избежать ряда недоразумений, приняв с самого начала, что объекты и сущности должны иметь только *относительно* неизменные характеристики, а также приняв, что наши описания происходящих с ними процессов — всего лишь приближения в том смысле, что мы игнорируем (на законных для данного уровня основаниях) все движения, относящиеся к атомному, ядерному и более низким уровням. Приняв во внимание и эти движения, мы без труда разберемся в превращениях, при которых возникают и прекращают существовать такие «сущности», как жидкости, твердые тела, металлы и газы, — все это окажется следствием «внутренних» движений, происходящих на этих низших уровнях.

Обращаясь далее к молекулярному, атомному и «элементарно-частичечному» уровням, мы сталкиваемся опять с подобными же фактами. Так, например, атом, являющийся неизменной сущностью на своем собственном уровне (по-гречески само слово «атом» означает «неделимый»), оказывается способным к самым коренным изменениям вследствие «внутренних» движений своих электронов, протонов и нейтронов точно так же, как изменяются макроскопические тела. Поистине никогда еще не попадалось нам сущностей, которые были бы лишены способности к изменениям.

Так неужели мы не можем удержаться от предположения об абсолютной неизменности того, что на данном этапе неизвестно? Подобно тому как это уже делалось на уровне макроскопического опыта, можно

рассматривать те сущности и структуры, с которыми мы сталкиваемся на низших уровнях, как *относительно инвариантные*, или относительно устойчивые, в смысле их характеристик. В той области, где эти сущности или структуры относительно инвариантны, об их движениях и превращениях можно говорить примерно так же, как обычно говорят о предметах обыденного опыта. Ясно, что мы ничего не потеряем, если откажемся от представлений об абсолютной неизменности в пользу неизменности относительной.

Совершенно очевидно, что экспериментально невозможно доказать абсолютной неизменности никакого объекта. Ведь если наши объекты не изменяются в рамках данного опыта, то нет никаких гарантий, что они *никогда* не будут меняться, как бы мы ни расширяли в дальнейшем эти рамки. Именно так произошло со всем, что считалось абсолютно неизменным.

Отсюда ясно, что, говоря о сущностях и структурах как об относительно неизменных, *хотя границы области этой неизменности еще не установлены*, мы избегаем неупругих и недоказуемых предположений о якобы абсолютной неизменности этих сущностей и структур. Такой подход имеет громадные преимущества в научных исследованиях, ибо главный источник трудностей при формулировке новых представлений, причем не только в физике, но во всей науке вообще, — это тенденция продолжать придерживаться старых представлений вне области их применимости. На руку этой тенденции играет, очевидно, наша привычка представлять себе известные нам сущности и структуры как абсолютно неизменные в их характеристиках.

---

## Опровержение теорий

Последние рассуждения, может быть, удастся пояснить, обратившись к вопросу, значение которого энергично подчеркивал профессор Поппер<sup>1)</sup>. Он утверждал, что *опровержимость* теории во многих случаях гораздо существеннее ее *доказуемости*<sup>2)</sup>. Например, тот факт, что преобразования Галилея оказались неверными, привел в конце концов к революционным изменениям, способствовавшим развитию теории относительности. Аналогично, опыты, показавшие ложность предсказаний классической физики относительно атомных спектров, наблюдения фотоэлектрического эффекта и данные о

---

<sup>1)</sup> К. Поппер — известный современный философ неопозитивист (в настоящее время работает в Англии). — *Прим. ред.*

<sup>2)</sup> В оригинале здесь и далее автор использует терминологию, употребляемую Поппером в своих работах. Основной тезис Поппера состоит в том, что отсутствие противоречащих научной теории фактов и мыслимая возможность ее опровержения при выходе за пределы известной на сегодня области ее применимости являются достаточным критерием ее истинности. Этот тезис Поппер называет «принципом фальсификации». Принцип фальсификации как критерий истинности научной теории должен, согласно Попперу, заменить собой более жесткий «принцип верификации» (т. е. эмпирической подтверждаемости теории), который не всегда можно применить. Термины «фальсификация» и «верификация» в указанном выше смысле едва ли знакомы большинству читателей. Поэтому во избежание недоразумений в переводе в соответствующих случаях используются обычные, отвечающие контексту термины, например «опровержение», «доказуемость», «подтверждение» и т. п. «Фальсифицируемость» в смысле «опровергаемость» по отношению к научным теориям, разумеется, имеет лишь тот смысл (неоднократно подчеркиваемый автором), что эти теории имеют ограниченную область применимости. — *Прим. ред.*

распределении излучения черного тела привели к еще более революционным изменениям и к созданию квантовой механики. А самые последние данные, говорящие о непригодности наших представлений о том, что существуют «неизменные» элементарные частицы, возможно, послужат основанием для таких изменений этих представлений, по сравнению с которыми даже изменения, внесенные теорией относительности и квантовой механикой, могут показаться незначительными.

Ясно, что в развитии физики (равно как и науки вообще) опровержение старых теорий играло поистине решающую роль. Небольшое размышление по этому поводу показывает, что такой процесс является необходимой составной частью развития науки и что это развитие будет иметь место только тогда, когда научные теории поддаются опровержению<sup>1)</sup>.

Возьмем, например, теорию Птолемея: путем включения систем эпициклов ее можно подогнать под любые возможные результаты наблюдений. Такую теорию не могут опровергнуть вообще никакие эксперименты. *Но ведь теории, которые по самой своей природе нельзя опровергнуть, в действительности не дают нам никаких новых знаний о мире.* Так, их свойство приспособляться к любым конкретным открытиям означает, что они не допускают вообще никакой возможности получить какие-либо определенные выводы относительно того, что еще не известно. В лучшем случае они лишь позволяют суммировать опытные факты. Однако такие теории, как, например, Ньютона или Эйнштейна, нельзя подогнать к произвольным экспериментальным данным, и, следовательно, они оказались способными *строго* предсказать те явления, которые были еще не известны, когда эти теории впервые формулировались. Если такая теория неверна, то это можно проверить и показать, что она ошибочна. Эта возможность неотделима от способности теории предсказывать нечто новое в нашем мире, а значит, и быть истинно научной теорией (истинной

---

<sup>1)</sup> Более подробное обсуждение этого вопроса можно найти в книге Поппера (K. R. Popper, *Conjectures and Refutations*, London, 1963).

в том смысле, что она дает правильные сведения, выходящие за пределы тех областей, для которых имеются экспериментальные данные, приведшие к ее возникновению).

Поэтому теория, позволяющая сделать реальные предсказания, должна, так сказать, «высовывать голову». А раз так, то может наступить время, когда ей «отрубят голову». Действительно, это произошло в конце концов со множеством теорий, например с механикой Ньютона. Эти теории вплоть до определенного момента подтверждались, а затем оказались ошибочными. Более того, можно полагать, что это в конце концов судьба *всех* теорий. Так, специальная теория относительности Эйнштейна не может быть абсолютно истинной хотя бы уже потому, что является приближением к его общей теории относительности. Но и общая теория относительности не является абсолютно истинной, как неявно признал сам Эйнштейн, когда он занялся поисками еще более общей «единой теории поля», которая, как он надеялся, включала бы общую теорию относительности, электродинамику и теорию элементарных частиц в качестве приближений и предельных случаев<sup>1)</sup>. Кроме того, как мы уже отметили, классическая механика ошибочна в том смысле, что она является приближением -- предельным случаем квантовой механики, т. е. теории совсем другого рода. Теперь же становится вероятным, что современная теория элементарных частиц вместе с квантовой механикой окажется неверной — снова в том смысле, что эти теории будут приближениями какой-то еще не известной, весьма своеобразной и еще более общей теории.

Возникают вопросы: если используемые научные теории не только *опровержимы*, но и, весьма вероятно, *действительно неверны*, то какой смысл искать истину с помощью научных исследований? Не вскрывает ли таким образом тезис Поппера противоречие глубокого характера во всех стремлениях, целях, средствах, методах и достижениях науки?

<sup>1)</sup> В связи с этим вспомним (см. гл. 22) еще и о других причинах, в силу которых можно ожидать, что область применимости теории относительности будет ограниченной.



Причины возникновения этой проблемы лежат в определенном отношении к истине в науке, понятие о которой, подобно представлениям об абсолютном пространстве, времени и неизменном веществе, вошло в привычку и может показаться неизбежным. Это отношение сводится к тому, что *основные* законы науки рассматриваются как *абсолютные истины*, т. е. предполагается, что они выполняются точно (а не приближенно) в сколь угодно широких пределах и при всех возможных условиях, так что они никогда не будут модифицированы, опровергнуты или коренным образом изменены. Например, до открытия теории относительности и квантовой механики законы движения Ньютона, а также его представления о пространстве и времени рассматривались как абсолютные истины этого рода. Позже многие ученые, возможно, стали принимать теорию относительности и квантовую механику за действительно абсолютные истины, когда они почувствовали, что механика Ньютона не относится к таким «вечным истинам».

Откуда произошло понятие «абсолютной истины»? Очевидно, что еще по крайней мере в средние века это понятие уже играло основную роль. Тогда, например, доктрины Аристотеля всеми рассматривались как абсолютные истины. Углубляясь еще дальше в прошлое, можно убедиться, что в истории неизвестно общества, которое не принимало бы *какие-либо* доктрины, представления или идеи за абсолютные истины. Поэтому поиски абсолютной истины можно считать продолжением традиции, зародившейся еще в далеком прошлом.

Однако, как и в случае неизменного вещества, человечество никогда не встречалось с такими *общими* утверждениями, которые не были бы приближениями, справедливыми в ограниченной области и при определенных условиях. Более того, даже если бы существовали общие утверждения, ограниченная применимость которых еще не была бы обнаружена, то (как и в случае гипотезы об абсолютно неизменных веществах) все равно не было бы никаких оснований думать, что они останутся верными при неограниченном расширении области их применимости. Значит, понятие абсолютной исти-

ны не основывается на фактах, и его необходимость нельзя доказать никакими экспериментами.

Более того, ясно, что нет никакой необходимости в предположении об абсолютной верности любого наперед взятого закона. Любые законы, принимаемые все же за абсолютные истины, можно при хорошем согласии с опытными данными рассматривать как *соотношения, справедливые в некоторой области*. Границы такой области могут быть указаны, когда закон в конце концов опровергается при дальнейшем изучении и исследовании и заменяется новым законом или рядом законов, содержащих старый как приближение или предельный случай. Например, как мы видели, было найдено, что механика Ньютона неприменима, когда скорость близка к скорости света, и должна быть заменена теорией Эйнштейна, откуда следует, что законы Ньютона справедливы лишь для достаточно малых скоростей.

Однако не нужно думать, что в конце концов мы можем *полностью и совершенно* узнать область применимости данного закона и, таким образом, получить своего рода абсолютную истину, утверждающую, что по крайней мере в конкретной и хорошо определенной области данный закон *всегда* применим. Дело в том, что наши знания об этой области сами неполны. Например, по отношению к законам Ньютона было найдено, что даже в области малых скоростей, границы которой определились теорией относительности, эти законы неприменимы на атомном уровне, где требуется применять квантовую механику; то же самое, возможно, имеет место и в сверхгалактических масштабах пространства и времени, и внутри сверхплотных звезд, где начинают играть важную роль эффекты общей теории относительности. Мы не можем утверждать, что нет еще других, неизвестных ограничений применимости законов Ньютона (такие ограничения будут выявлены при дальнейших исследованиях). Поэтому можно лишь сказать, что нужно быть всегда готовыми принять новые дополнительные ограничения на область применимости любого закона, даже когда некоторые ограничения такого рода нам уже известны.

Однако ясно, что поскольку, вообще говоря, могут быть открыты законы, область применимости которых *так или иначе выходит за рамки того опыта, на котором они основывались*, то тем самым сохраняются условия, позволяющие выполнять научные исследования прежними методами. При таком исследовании, очевидно, не требуется, чтобы какие-либо из этих законов были абсолютными истинами — лишь бы они подтверждались объективно в определенной области и могли быть опровергнуты в расширенной области.

Если принять во внимание смысл понятия «закон», описанный выше, то тезис Поппера о необходимости опровержения теории, кажется, возникает совершенно естественно. Так, нам теперь не нужно больше предполагать, что научная теория является либо совершенно верной, и, следовательно, «вечной истиной», либо совершенно ошибочной и поэтому не представляет вообще никакой ценности. Более того, закон природы, по самому нашему способу формулировки его, оказывается, выражает тот факт, что при определенных изменениях, происходящих в природе, равно как и при соответствующих изменениях точек зрения, систем отсчета, методов исследования и пр., могут быть открыты некоторые общие соотношения, которые остаются теми же самыми при всех этих изменениях. Но эта инвариантность должна пониматься как *лишь относительная* в том смысле, что при расширении области *следует принимать* во внимание возможность нарушения закона. Иначе говоря, он может быть опровергнут в некоторой будущей серии опытов. Мы не связываем себя утверждением, когда именно, где и как он будет опровергнут, предоставляя решение этого вопроса будущему. Существенно только то, что мы не закрываем этот вопрос. Напротив, мы всегда подготовлены к опровержению, когда оно наступает, но не к «кризису», когда наши представления об абсолютных истинах и о «вечных истинах» вновь и вновь разбиваются вдребезги и низвергаются, как это случалось неоднократно с тех пор, как человечество занялось поиском таких истин.

Как ни важна опровержимость теорий, очевидно, что их создают *не только* для того, чтобы потом пока-

зять их ложность. Напротив, как уже указывалось, приемлемая научная теория должна быть способна выдержать ряд экспериментальных проверок и критических замечаний, тем самым она покажет, что приводит к правильным выводам и за пределами тех фактов, на которых первоначально основывалась. Конечно, выводы из некоторых утверждений могут иметь столь малую область применимости, что они будут либо тривиальными, либо будут иметь ничтожное значение (например, вывод: карандаш лежит на столе). Истинно научный закон имеет довольно широкую область применимости. Поэтому одной из целей научного исследования является отыскание законов с более широкой по возможности областью применимости.

Ясно, что без установления таких законов была бы почти невозможна сама наука в том виде, какой мы ее знаем. Так, большая часть научных исследований основана (или должна быть основана) на попытках показать, что теория, уже хорошо подтвержденная в широкой области, может применяться с еще большей степенью точности, а также к новым проблемам. Эта теория помогает поставить такие вопросы, которые важны при нашем изучении природы. Если бы такая теория отсутствовала, то наши исследования имели бы тенденцию вырождаться в случайное и беспорядочное коллекционирование разрозненных фактов. Большинство этих фактов, вообще говоря, будет иметь мало отношения друг к другу и к открытию законов природы.

Однако, как мы видели, в конце концов будет происходить так, что новые исследования, проводимые для подтверждения удачной теории описанного выше типа, приведут либо к ее опровержению, либо к произвольно вводимым *ad hoc* гипотезам, включающим недопустимую степень неопределенности и путаницы, что в сущности более или менее равносильно опровержению. Такой вывод позволяет установить не только границы области применимости этой теории, но и дает нам обычно неоценимую информацию, помогающую сформулировать новые законы с более широкими областями применимости и включающую также те предсказания старых законов, которые известны как правильные (их можно

рассматривать как предельные случаи и приближения). Эта информация, конечно, не дает прямых указаний на форму новых законов. Отыскание таких законов на деле зависит от творческой деятельности некоего ученого, от его способности найти новый способ подхода к вещам (новая гипотеза, новая идея и т. д.), позволяющий решить проблемы, не разрешимые со старых позиций. Тем не менее возможность такой творческой деятельности зависит от уровня развития науки, когда совместно действуют факторы подтверждения и опровержения прежних теорий, дополняя друг друга как одинаково важные стороны развития научного познания.

После того как мы убеждаемся, что новая теория способна давать дополнительные предсказания, выходящие за пределы тех фактов, которые помогли создать ее, мы наблюдаем у этой теории тенденцию стать основой мировоззрения, развитие которого выдвинет вопросы, связанные с дальнейшим изучением природы. Однако это приведет к тому, что новую теорию постигнет участь ее предшественников<sup>1)</sup>.

Тогда ясно, что процесс нахождения истины в науке — никогда не кончающийся процесс; он не является поиском каких-то неизменных и хорошо определенных систем принципов, познание которых означало бы, что достигнута конечная цель научных исследований. Более того, процесс нахождения истины не представляет собой *постепенное приближение* к такого рода системе принципов как к пределу, который никогда не может быть достигнут, но к которому можно приблизиться в сходящейся последовательности. Истину нельзя сравнить с каким-нибудь веществом, которое можно было бы собирать каплю за каплей и накапливать в постоянно растущей «сокровищнице» истины.

Представление о том, что *мы не знаем* абсолютной истины, но тем не менее непрерывно приближаемся к ней, очевидно, так же недоказуемо и излишне, как и представление о том, что мы уже знаем или можем

<sup>1)</sup> Дальнейшее обсуждение такого пути развития научных теорий см. в книге Куна (T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, International Encyclopedia of Unified Science, Vol. 11, No. 2, Chicago, 1962).

в конце концов узнать полностью такую абсолютную истину. Все, что мы действительно знаем, и все, что мы действительно можем утверждать, — это то, что любая система законов науки обладает пока еще не вполне известной областью применимости. Нет вообще никакой необходимости тем или иным способом связывать себя с некой предполагаемой абсолютной истиной, которую мы не знаем и не сможем узнать, но к которой, как мы думаем, можно приблизиться. К тому же наряду со своей ненужностью и необоснованностью такое самоограничение запутывает нас, ибо оно предполагает, что путь к истине является продолжением одного или нескольких прежних направлений, причем расхождение между предсказаниями наших законов и действительным положением вещей становится все меньше и меньше. Однако реальный ход развития науки показывает, что такого процесса постепенной сходимости нет. Более того, как и в случае теории относительности и квантовой механики, ясно, что, вообще говоря, старые представления ведут по *совершенно ложному пути*, когда их распространяют за пределы области применимости, и что необходимы радикально новые представления, которые хотя и противоречат старым, но в некотором смысле в то же время содержат их как предельные случаи и приближения. Таким образом, представление о постепенном и сходящемся приближении к какой-то застывшей абсолютной истине в действительности вводит в заблуждение.

Аналогичным образом представление о постепенном накоплении «крупинок» некой абсолютной истины также противоречит реальным фактам. Так как это представление предполагает, что хотя мы и не знаем абсолютной истины в целом, мы имеем частицы ее, являющиеся абсолютно верными независимо от других частиц, которые будут открыты позже. Однако, как мы видели, каждая такая частица (например, механика Ньютона) обладает лишь определенной областью применимости, причем полные и точные границы последней никогда не удастся узнать (в том смысле, что новые открытия могут всегда *противоречить* обнаруженным ранее законам в некоторых еще не предсказанных отношениях).

Следовательно, любая данная «частная истина» никак не может рассматриваться даже в качестве «кирпичика», образующего вместе с другими все растущее здание истины, на каждую из частей которого можно *всегда* полагаться (по крайней мере в конкретных областях, границы которых полностью определены).

Мы видим, что истина познается существенно динамическим образом, т. е. наше знание может в любой своей части претерпевать новые радикальные изменения, причем такие, которые противоречат самым неожиданным образом прежней системе взглядов и содержат принципиально новые и неожиданные детали. На каждом этапе это познание выражается в виде системы теорий. Эти теории на данном этапе проявляют способность не только объяснять факты, известные к моменту формулировки теорий, но и правильно предсказывать широкий круг новых явлений, выходящих за пределы этих фактов. Можно надеяться, что большая часть этих теорий останется справедливой и в *некотором* круге дальнейших экспериментов, поставленных с целью применения, разработки, испытания и проверки их в более широкой области. Однако время от времени большая или малая часть всей этой системы теорий опровергается, ввиду чего должны разрабатываться новые теории. Этот процесс не включает ни постоянного накопления теорий, ни приближения к чему-либо конкретному как к пределу последовательности. Все достигнутое на каждом данном этапе, конечно, в свое время публикуется в журналах и учебниках, с тем чтобы стать доступным для приложения в технике, для изучения, а также для *дальнейшего* развития и критики со стороны исследователей. И это происходит на стыке новых проблем, постоянно рождающихся на почве прежних теорий, однако научная истина имеет свою собственную жизнь как «точка роста», в которой человек всегда встречается с тем, что ему до сих пор не было известно.

Мы еще вернемся к этому вопросу в приложении, § 4.

---

*Диаграммы Минковского  
и метод коэффициента  $k$*

До сих пор обсуждались эйнштейновские релятивистские представления о пространстве и времени с физической и математической точек зрения — математическое рассмотрение основывалось главным образом на преобразованиях Лоренца, выражающихся формулами (14.3) и (14.4). Теперь мы рассмотрим теорию относительности с помощью *геометрического* метода, развитого Минковским и помогающего в другом свете представить сущность этой теории.

Мы начнем с так называемых «диаграмм Минковского» на пространственно-временной плоскости (фиг. 9). При обсуждении таких диаграмм сначала рассмотрим наблюдателя  $\Omega$ , покоящегося относительно лаборатории. Координату времени, измеряемого этим наблюдателем, мы будем откладывать на линии  $OA$ , а одну из пространственных координат  $z$  — на линии  $OB$ . В принципе следовало бы ввести и другие две пространственные координаты  $x$  и  $y$  так, чтобы наша диаграмма стала четырехмерной. Однако во многих случаях достаточно рассматривать лишь  $z$  и  $t$ , т. е. двумерную диаграмму.

Каждая точка<sup>1)</sup> этой диаграммы изображает некоторое *событие* (например, вспышку светового сигнала). Каждое реальное событие, конечно, должно происходить в течение какого-то интервала времени и занимать некоторую область пространства. Если, однако,

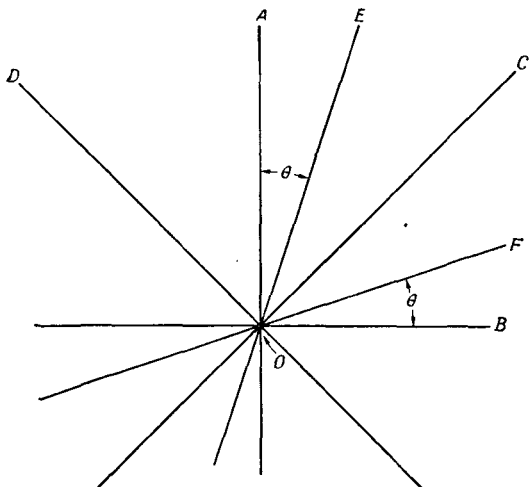
---

<sup>1)</sup> Начиная с этой главы, автор под «точкой» понимает *мировую точку* или *событие*, взятое в четырехмерном пространстве, так что это — не только место в пространстве, но и момент времени. — *Прим. перев.*



этот интервал времени очень короткий, а область пространства соответственно мала, то можно заменить реальное *протяженное событие* простейшей абстракцией — *точечным событием*.

Пусть точка  $O$  представляет такое событие; оно произошло в момент  $t=0$  с наблюдателем, находившимся



Фиг. 9.

в точке  $z=0$ . Если этот наблюдатель покоился относительно лаборатории, то события, происходящие с ним в течение некоторого времени, расположатся на прямой  $OA$ , которая на нашей диаграмме является осью времени  $t$ . Такая линия называется *мировой линией*. При этом прямая  $OB$  будет представлять все те события, которые одновременны с  $O$ , если измерения проводятся этим наблюдателем.

Удобно перейти к таким единицам измерения времени, при которых скорость света  $c$  равна единице. Сделать это можно, положив  $\tau = ct$ . Если теперь считать, что по оси  $OA$  время отложено в единицах  $\tau$ , то распространение лучей света ( $z = \pm \tau$ ) изобразится на диа-

грамме Минковского двумя линиями,  $OC$  и  $OD$ , наклоненными к осям  $z$  и  $\tau$  под углом  $45^\circ$ .

Для трех пространственных измерений, конечно, будет много больше возможных направлений распространения световых лучей, и полная совокупность их с началом в точке  $O$  будет изображаться конусом. Тогда прямые  $OC$  и  $OD$  соответствуют пересечению такого «светового конуса» и плоскости  $z\tau$ .

Введем теперь второго наблюдателя  $\Omega_2$ , летящего на ракете со скоростью  $v$  мимо лаборатории. Его движение описывается формулой

$$z = \frac{v}{c} \tau$$

и изображается мировой линией  $OE$ , наклон которой относительно оси  $\tau$  можно найти по формуле

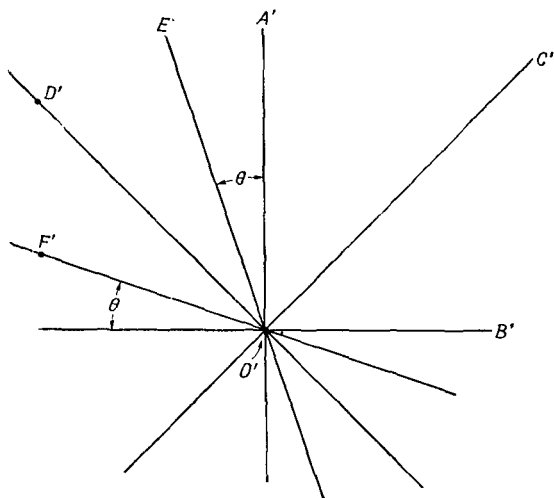
$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v}{c}.$$

Согласно выводам, сделанным в гл. 13, такой наблюдатель будет считать одновременными другие события, а не те, что были одновременны с точки зрения наблюдателя  $\Omega_1$ , связанного с лабораторией. Так, если  $\tau'$  и  $z'$  — координаты, измеряемые наблюдателем  $\Omega_2$ , то равенство  $\tau' = 0$  выражает для него одновременность соответствующих событий. Из преобразования (14.3) следует, что если  $\tau' = ct' = 0$ , то  $t = (v/c^2)z$ , откуда  $\tau = (v/c)z$ . Все определенные таким образом точки ложатся на прямую  $OF$ , имеющую наклон  $\theta = \operatorname{arctg} (v/c)$  к оси  $z$ .

Согласно принципу относительности (см. гл. 16 и 17), «привилегированных» систем отсчета не существует, так что в каждой системе отсчета все основные законы выражаются одинаковыми соотношениями. Поэтому можно с таким же правом использовать диаграмму Минковского, в которой наблюдатель на ракете считается покоящимся, а лаборатория — движущейся относительно ракеты со скоростью  $-v$ . Такая возможность изображена на фиг. 10, где прямая  $O'A'$  является мировой линией ракеты, а  $O'B'$  — совокупность событий, одновременных с точки зрения наблюдателя на ракетном корабле. Тогда мировой линией наблюдателя в лаборатории

будет прямая  $O'E'$ ; для этого наблюдателя событие  $O'$  является одновременным со всеми событиями, лежащими на прямой  $O'F'$ , в соответствии со скоростью лаборатории относительно ракеты, равной  $-v$ .

Одним из самых простых и изящных путей дальнейшего анализа смысла принципа относительности с помощью диаграмм Минковского является использование



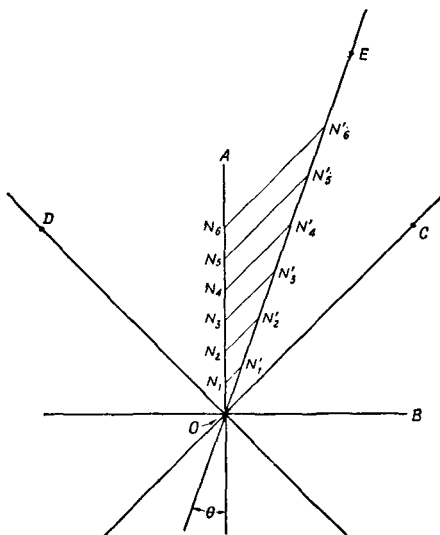
Ф и г. 10.

«метода коэффициента  $k$ ». Этот метод<sup>1)</sup> основан на рассмотрении системы наблюдателей, каждый из которых снабжен часами одной и той же конструкции и радиолокатором, импульсы которого управляются этими часами и, таким образом, следуют друг за другом через одинаковые промежутки времени. Предполагается, что наряду с радиолокационным передатчиком каждый наблюдатель имеет и соответствующий приемник, способ-

<sup>1)</sup> Его предложил Г. Бонди в своей популярной лекции. (См. Г. Бонди, Относительность и здравый смысл, изд-во «Мир», 1967. — Прим. перев.)

ный отмечать моменты прихода сигналов (по часам этого наблюдателя) — как его собственных, отразившихся от окружающих объектов, так и посланных другими наблюдателями.

Пусть сначала мы покоимся в лаборатории и посылаем сигналы в упорядоченные моменты времени  $N_1$ ,



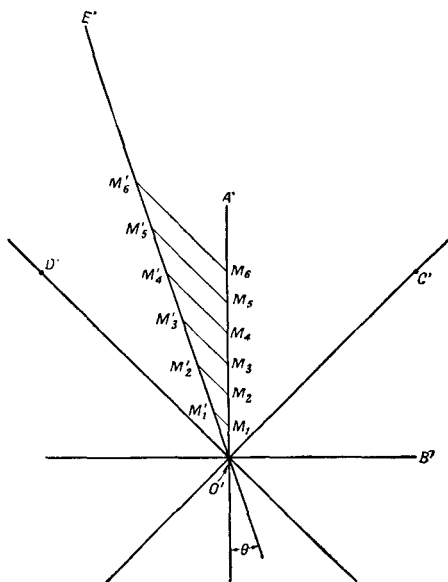
Фиг. 11.

$N_2, N_3$  и т. д., как это изображено на фиг. 11. Наши сигналы распространяются со скоростью света, и их принимает наблюдатель на ракете (мировая линия  $OE$ ) в соответствующие моменты времени, которые мы обозначим, как  $N'_1, N'_2, N'_3$  и т. д. Пусть временной интервал между импульсами, измеренный лабораторными часами, равен  $T_0$ . Тогда наблюдатель в ракете измерит другую величину интервала между моментами приема следующих друг за другом импульсов, скажем  $T$ . Очевидно, что  $T$  и  $T_0$  должны быть, вообще говоря, разными. Действительно, даже в теории Ньютона интервал

$T_0$  не будет равен  $T$  вследствие доплеровского смещения является другой функцией скорости ракеты, чем это отношение

$$k = \frac{T}{T_0} \quad (26.1)$$

является другой функцией скорости ракеты, чем это было в теории Ньютона.



Фиг. 12.

Согласно принципу относительности, этот опыт может быть обращен. Тогда наблюдатель на ракете посылает равноотстоящие во времени импульсы в моменты  $M_1, M_2, M_3$  и т. д., как показано на фиг. 12, причем по его часам интервал между соседними импульсами равен  $T_0$ . Наблюдатель в лаборатории принимает эти импульсы в моменты времени  $M'_1, M'_2, M'_3$  и т. д., причем

интервал между ними равен  $T'$ . Определим отношение

$$k' = \frac{T'}{T_0}, \quad (26.2)$$

величину которого можно найти следующим образом.

Заметим, что на фиг. 12 прямые  $M_1M'_1$ ,  $M_2M'_2$  и т. д. (равно как прямые  $N_1N'_1$ ,  $N_2N'_2$  и т. д. на фиг. 11) изображают распространение радиосигналов и имеют наклон  $45^\circ$  соответственно тому, что скорость света одинакова в обеих системах отсчета и равна  $c$ . В этом и заключается учет в диаграммах Минковского того опытного факта, что скорость света постоянна и имеет одинаковую величину для всех наблюдателей.

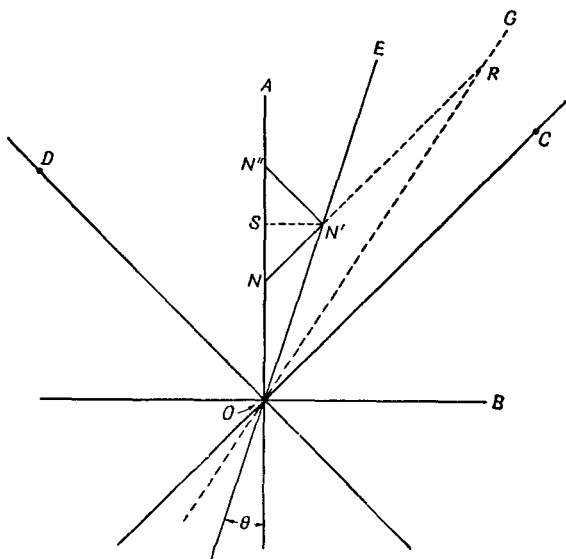
Очевидно, что проведенные в двух системах отсчета опыты равноправны и должны описываться симметричным образом, если каждый из них относить к системе отсчета соответствующего наблюдателя. Но в обоих случаях последовательные импульсы посылались через интервалы времени  $T_0$  по тем часам, которые управляли посылкой этих сигналов. В обоих случаях импульсы распространялись со скоростью  $c$  и принимались наблюдателем, удаляющимся от их источника со скоростью  $v$ . Согласно принципу относительности, если два разных наблюдателя производят эквивалентные действия, то эти действия будут протекать по одним и тем же законам. Поэтому мы должны заключить, что отношение  $k' = T'/T_0$  должно быть равно отношению  $k = T/T_0$ , т. е.

$$k = k'. \quad (26.3)$$

Следует, однако, помнить, что этот вывод справедлив лишь в релятивистской теории, согласно которой скорость света одинакова во всех системах отсчета. Например, в теории Ньютона распространение лучей света описывается линиями, наклоненными к осям под углом  $45^\circ$ , лишь в системе, покоящейся относительно эфира, так что наше рассуждение, показывающее, что  $k$  и  $k'$  равны, там будет неправомерным.

Теперь можно перейти к определению коэффициента  $k$  как функции относительной скорости  $v$  двух наблюдателей. Для этого мы рассмотрим случай, когда наблюдатель в лаборатории (изображаемый мировой

линией  $OA$  на фиг. 13) обменивается сигналами с движущимся наблюдателем (мировая линия  $OE$ ). Предположим, что в начале опыта оба наблюдателя находились



Фиг. 13.

вблизи друг друга, когда их положение в пространстве и момент времени соответствовали началу координат  $O$ . Так как в этот момент сигналу требуется пренебрежимо малое время для пути между двумя наблюдателями, они смогут тогда синхронизовать свои часы. Для удобства положим, что оба наблюдателя поставили свои часы так, чтобы событие  $O$  соответствовало моментам

$$t = 0, \quad t' = 0.$$

Затем наблюдатель в лаборатории, находясь в точке, соответствующей событию  $N$ , посылает сигнал в момент  $T_0$ , измеренный по его часам. На ракете этот сигнал бу-

дет принят в точке  $N'$ . При этом наблюдатель на ракете отметит время

$$T = kT_0. \quad (26.4)$$

Пусть, однако, наблюдатель на ракете, приняв сигнал в точке  $N'$ , немедленно пошлет собственный сигнал. Последний будет принят в лаборатории в точке  $N''$  в момент  $T_1$ . Но полученный на основании принципа относительности вывод позволяет заключить, что

$$T_1 = kT = k^2 T_0. \quad (26.5)$$

Обратимся теперь к элементарной геометрии. Так как отрезки  $NN'$  и  $N'N''$  соответствуют световым лучам, они наклонены к осям под углом  $45^\circ$ , и поэтому

$$(SN') = (NS) = (SN'') = \frac{(NN'')}{2},$$

$$(SN') = (NS) = (OS) \operatorname{tg} \theta = (OS) \frac{v}{c} = \frac{(NN'')}{2},$$

$$(OS) = (ON) + (NS) = (ON) + \frac{(NN'')}{2},$$

$$(ON) = T_0,$$

$$(NN'') = T_1 - T_0 = \frac{k^2 - 1}{2} T_0,$$

$$(OS) \frac{v}{c} = \frac{k^2 + 1}{2} \frac{v}{c} T_0 = \frac{k^2 - 1}{2} T_0, \quad (26.6)$$

$$\frac{v}{c} = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1}, \quad (26.7)$$

$$k = \sqrt{\frac{1 + (v/c)}{1 - (v/c)}}. \quad (26.8)$$

Мы вычислили, таким образом, величину коэффициента  $k$  — основную во всем этом методе. Заметим, что при  $v=0$  она равна единице, как и следовало ожидать. Когда скорость  $v$  положительна, коэффициент  $k$  больше единицы, а когда  $v$  отрицательна, то  $k$  меньше единицы.

Коэффициент  $k$  фактически описывает релятивистский эффект Допплера (рассматриваемый под углом  $0^\circ$ ), который был нами вычислен ранее более окольным путем [выражение (17.12)] с помощью преобразований Лоренца. Однако на этот раз мы вывели эту формулу непосредственно из принципа относительности, пользуясь



фактом инвариантности скорости света при измерении ее наблюдателями, движущимися с разными скоростями.

Оказывается, с помощью метода коэффициента  $k$  можно вывести все основные формулы, полученные нами ранее на основании преобразований Лоренца. Чтобы проиллюстрировать эту возможность, выведем сначала формулу для сравнения скоростей хода эквивалентных часов, движущихся с разными скоростями. На основании фиг. 13 мы знаем, что за интервал времени, соответствующий  $ON'$ , наблюдатель на ракете зафиксирует интервал

$$T = kT_0. \quad (26.9)$$

С другой стороны, из-за того, что отрезок  $N'S$  перпендикулярен оси  $OA$ , наблюдатель в лаборатории будет считать событие  $N'$  одновременным с  $S$ . Таким образом, наблюдатель в лаборатории припишет событию  $N'$  временную координату

$$t = (OS) = (ON) + (NS) = (ON) + \frac{(NN'')}{2} = \frac{1+k^2}{2} T_0. \quad (26.10)$$

Поэтому отношение времен  $t/T$  одного и того же события  $N'$ , первое из которых измеряется наблюдателем в лаборатории, а второе — наблюдателем в ракете, равно

$$\begin{aligned} \frac{t}{T} &= \frac{k+k^{-1}}{2} = \frac{1+k^2}{2k} = \left[ 1 + \frac{1+(v/c)}{1-(v/c)} \right] \frac{1}{2k} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(v/c)}} = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \end{aligned} \quad (26.11)$$

Итак, мы непосредственно вывели закон «замедления» хода часов, не обращаясь к преобразованиям Лоренца. Столь же непосредственно можно теперь вывести и релятивистский закон сложения скоростей. Для этого возьмем третьего наблюдателя, изображенного на фиг. 13 мировой линией  $OG$ . Пусть его скорость относительно лаборатории равна  $w$ . Коэффициент  $k$ , соответствующий этому наблюдателю, можно вычислить двумя разными способами. Мы будем сначала исходить из лабораторной системы отсчета и отправим из точки  $N$

сигнал в момент  $T_0$ . Наблюдатель  $OG$  примет его в точке  $R$  в момент времени

$$T_2 = k(w) \cdot T_0, \quad (26.12)$$

где

$$k(w) = \sqrt{\frac{1 + (w/c)}{1 - (w/c)}}.$$

Однако выражение для  $T_2$  можно получить также в два приема. Для этого рассмотрим прежде приход сигнала из  $N$  в  $N'$  в момент

$$T_1 = k(v) \cdot T_0 \quad (26.13)$$

(по часам наблюдателя в ракете), причем

$$k(v) = \sqrt{\frac{1 + (v/c)}{1 - (v/c)}}.$$

Затем наблюдатель в ракете сразу же посылает свой сигнал, мировая линия которого, конечно, совпадает с  $N'R$ . Если наблюдатель  $OG$  обладает скоростью  $u$  согласно измерениям, проводимым в системе отсчета ракеты, то на основании принципа относительности мы должны заключить, что

$$T_2 = k(u) \cdot T_1 = \sqrt{\frac{1 + (u/c)}{1 - (u/c)}} \sqrt{\frac{1 + (v/c)}{1 - (v/c)}} T_0. \quad (26.14)$$

Отсюда следует соотношение

$$\frac{[1 + (u/c)][1 + (v/c)]}{[1 - (u/c)][1 - (v/c)]} = \frac{1 + (w/c)}{1 - (w/c)} \quad (26.15)$$

или

$$k(w) = k(u) \cdot k(v). \quad (26.16)$$

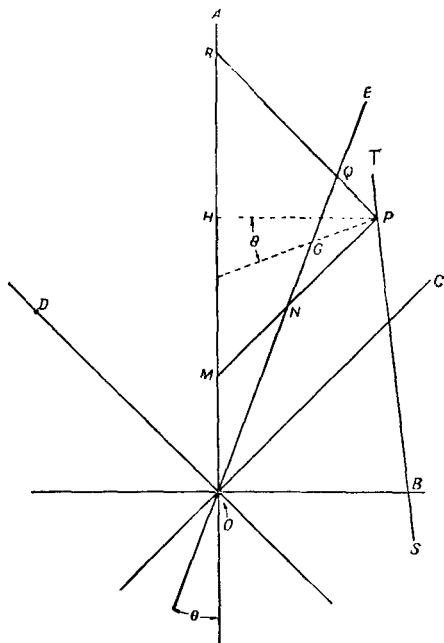
Таким образом, коэффициент  $k$  при двух последовательно проводимых преобразованиях равен произведению коэффициентов для каждого отдельного преобразования. С помощью элементарной алгебры получаем

$$w = \frac{u + v}{1 + (uv/c^2)}. \quad (26.17)$$

Это и есть релятивистский закон сложения скоростей (15.8).

Наконец, метод коэффициента  $k$  можно использовать для вывода самих преобразований Лоренца. Прежде

чем дать этот вывод, полезно отметить, что, поскольку скорость света одинакова для всех наблюдателей, нет необходимости пользоваться разными мерами для времени и расстояния. Более того, раз мы располагаем часами, то у нас уже имеется мера длины. Например, если



Фиг. 14.

мы посылаем сигнал радиолокатора к объекту, расположенному на расстоянии  $d$  от нас, то зная время  $\delta t$ , требующееся для распространения этого сигнала от нас до объекта и отраженного сигнала обратно к нам, получим расстояние  $d$  до этого объекта

$$d = \frac{c \delta t}{2} = \frac{\delta \tau}{2}. \quad (26.18)$$

Следовательно, достаточно, чтобы все наблюдатели имели одинаково сконструированные часы. Никаких дополнительных предположений о наличии у них стандартных линеек делать не нужно. Этот факт чрезвычайно упрощает логические обоснования процедуры измерения, так как в качестве стандартных часов можно использовать периоды колебаний атомов или молекул, которые ведут себя совершенно одинаково у всех наблюдателей.

Для вывода преобразований Лоренца обратимся к фиг. 14. Пусть наблюдатель в лаборатории  $OA$  и наблюдатель на ракете  $OE$  пролетают друг мимо друга в точке  $O$ , когда часы обоих показывают 0. В точке  $M$  наблюдатель в лаборатории посылает сигнал; в этот момент его часы показывают время  $T_1$ . В точке  $N$  этот сигнал достигает наблюдателя на ракете, который сразу же отвечает своим сигналом; его часы показывают при этом время  $T'_1$ . Оба эти сигнала следуют далее вместе, пока не достигают в точке  $P$  предмета, обладающего мировой линией  $ST$ . Отраженный импульс на обратном пути приходит в точку  $Q$ , где встречает космический корабль в момент  $T'_2$  по часам наблюдателя на этом корабле. Распространяясь дальше, этот импульс в точке  $R$  будет принят наблюдателем в лаборатории; часы наблюдателя в лаборатории показывают в этот момент время  $T_2$ .

Наблюдатель в лаборатории припишет событию  $P$  пространственные и временную координаты

$$\tau = ct = cT_1 + c \frac{T_2 - T_1}{2} = c \frac{T_2 + T_1}{2}, \quad (26.19)$$

$$x = c \frac{T_2 - T_1}{2}, \quad (26.20)$$

$$\tau + x = cT_2, \quad \tau - x = cT_1. \quad (26.21)$$

Согласно принципу относительности, наблюдатель на ракете получит аналогичную систему формул:

$$\begin{aligned} \tau' = ct' &= \frac{c}{2} (T'_1 + T'_2), & x' &= \frac{c}{2} (T'_2 - T'_1), \\ \tau' + x' &= cT'_2, & \tau' - x' &= cT'_1. \end{aligned} \quad (26.22)$$

Вместе с тем метод коэффициента  $k$  дает

$$\begin{aligned} T'_1 &= kT_1, & T_2 &= kT'_2, \\ T'_1 T'_2 &= T_1 T_2. \end{aligned} \quad (26.23)$$

Учитывая равенство  $\tau = ct$ , получаем отсюда

$$\begin{aligned} \left(t' + \frac{x'}{c}\right)\left(t' - \frac{x'}{c}\right) &= (t')^2 - \frac{(x')^2}{c^2} = \\ &= T'_1 T'_2 = T_1 T_2 = t^2 - \frac{x^2}{c^2}. \end{aligned} \quad (26.24)$$

Это соответствует (в одномерном случае) инвариантности квадрата интервала, полученной на основании преобразований Лоренца [см. (9.7) и (9.8)].

Из (26.19) и (26.20) мы найдем теперь

$$t = \frac{kT'_2 + (T'_1/k)}{2}, \quad \frac{x}{c} = \frac{kT'_2 - (T'_1/k)}{2}. \quad (26.25)$$

С помощью простых алгебраических преобразований эти выражения легко привести к виду

$$t = \frac{t' - (vx'/c^2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad x = \frac{x' - vt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (26.26)$$

Это и есть преобразование Лоренца.

Метод коэффициента  $k$  позволяет довольно наглядно понять, почему два различных наблюдателя приписывают свойство одновременности разным наборам событий. Действительно, в соотношениях (26.19) — (26.22) просто постулируется, что когда какой-либо наблюдатель посылает радиолокационный импульс, то он *считает*, что событие  $P$  происходит одновременно с событием на его мировой линии, которое расположено точно посередине между точками посылки исходного и приема отраженного импульсов. Так, на фиг. 14 наблюдатель в лаборатории полагает, что событие  $P$  произошло одновременно с событием  $H$ , лежащим посередине между  $M$

и  $R$ , а наблюдатель на ракете полагает, что событие  $P$  произошло одновременно с событием  $G$ , лежащим посередине между  $N$  и  $Q$ . Мы уже обращали внимание читателя на тот факт, что понятие одновременности в теории относительности условно (см. гл. 12), и качественно обсуждали этот факт на примере наблюдателей в поезде и на железнодорожной насыпи. Теперь мы увидели более точно, как равенство скоростей света для обоих наблюдателей и эквивалентность используемых ими условий, определяющих одновременность, приводят к невозможности для этих наблюдателей прийти к одним и тем же выводам о том, какие события происходят в одно и то же время. Тем самым показаны причины того, почему для разных наблюдателей совокупности одновременно происшедших событий должны быть разными, как это видно на фиг. 9 и 10.

Метод коэффициента  $k$ , очевидно, совершенно непосредственно приводит нас ко многим соотношениям, исторически впервые выведенным на основании преобразований Лоренца. Преимущество метода коэффициента  $k$  в том, что он делает совершенно очевидной связь между этими соотношениями и основными принципами и фактами, на которых базируется теория. На самом деле, мы исходили здесь из принципа относительности и инвариантности величины скорости света и обнаружили, что сами преобразования Лоренца просто следуют из ряда геометрических и структурных свойств, которыми обладают определенные системы физических событий. Тем не менее, несмотря на свои изящество и эффективность, метод коэффициента  $k$  все еще не получил такого развития, чтобы он смог полностью заменить преобразования Лоренца при описании *всех* возможных соотношений, существенных для теории относительности. Положение сейчас таково, что подход, использующий преобразования Лоренца, и метод коэффициента  $k$  дополняют друг друга в том смысле, что каждый из них освещает теорию с той стороны, с какой другой метод не может сразу дать результаты. К тому же метод коэффициента  $k$  еще сравнительно молод, так что большая часть существующей литературы пользуется языком преобразований Лоренца. Хотя не исключено, что

метод коэффициента  $k$  может получить в конце концов такое развитие, что заменит преобразования Лоренца как основу математической теории, все же нужно думать, что по крайней мере в течение некоторого времени преобразования Лоренца сохранят за собой роль основы теории, тогда как метод коэффициента  $k$  будет служить в качестве дополнительного средства, разъясняющего смысл теории относительности.

---

*Геометрия событий  
и пространственно-временной  
континуум*

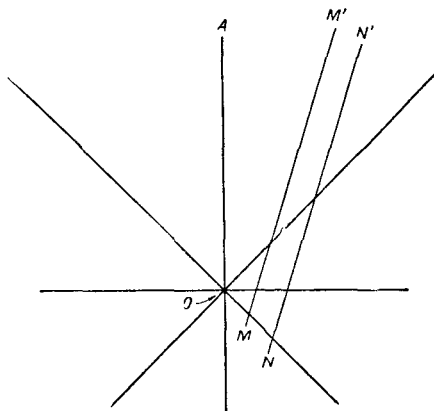
В предыдущей главе мы показали, как с помощью диаграмм Минковского на языке *событий* (например, посылки и приема сигналов) и *процессов* (например, распространения радиолокационного сигнала от передатчика к приемнику) описываются физические явления. Даже непрерывно существующий объект (например, наблюдатель) описывается с помощью соответствующей *мировой линии*, являющейся в действительности геометрическим местом непрерывного ряда событий, представляющих собой последовательные положения и моменты существования этого объекта. На самом деле, конечно, все реальные объекты (включая и наблюдателя) «размазаны» в пространстве. Поэтому они изображаются «мировыми трубками» (одну такую трубку мы изобразили на фиг. 15, начертив ее границы  $MM'$  и  $NN'$ ). Внутри этих трубок, вообще говоря, содержится весьма сложная система событий и процессов (например, происходят движения различных частей рассматриваемого объекта вплоть до его молекул, атомов, электронов, протонов и т. д.).

Диаграммы Минковского олицетворяют коренное изменение наших представлений об общей природе вещей. Чтобы понять, как это происходит, мы прежде всего вспомним, что в механике Ньютона существовало единое понятие одновременности. Там имело поэтому смысл считать, что мир в каждый момент состоит из различных объектов (все равно, на каком уровне описания — макроскопическом, атомном или электронном). В следующий момент все эти объекты будут продолжать



существовать, хотя каждый из них как-то изменит свое местоположение. Задача физики заключалась тогда в том, чтобы разложить мир на составляющие его неизменные основные объекты и проследить их движение с течением времени.

В гл. 24 мы отметили, что так как все известные нам объекты (включая так называемые «элементарные частицы») могут возникать, уничтожаться и испытывать



Фиг. 15.

разнообразные превращения, представление о неизменных объектах уже продемонстрировало свою непригодность для описания *опытных фактов*, установленных в отношении физических явлений. Теория относительности, однако, указывает и другие *теоретические аргументы*, говорящие против представлений о том, что мир в каждый момент есть некоторое объединение однозначно определенных объектов. Например, как мы видели, утверждение «в одно и то же время» теперь имеет смысл лишь по отношению к системе отсчета наблюдателя. Разные наблюдатели не будут согласны между собой в вопросе о том, какие события относятся к «одному и тому же времени», а потому эти наблюдатели будут

противоречить друг другу в своих утверждениях относительно основных свойств «объектов» — их длин, масс и пр.

Вводя диаграммы Минковского, мы затронули именно эту проблему. Теперь «объект» заменяется некоторой конструкцией из событий и процессов (например, мировой линией или мировой трубкой, изображающей наблюдателей). Обычно рассматриваемый относительно неизменный объект соответствует теперь такой конструкции из событий и процессов, которая стремится оставаться подобной себе в течение неопределенно больших промежутков времени. Объект, не обладающий таким постоянством, соответствует, конечно, изменяющейся и преобразующейся конструкции, имеющей в некоторой области свое начало (там, где объект «рождается»), а в другой области — конец (там, где объект «уничтожается»).

Описанный выше метод соответствует *переходу от разложения мира на составляющие его объекты к разложению его на события и процессы*, на основе которых конструируется, организуется и упорядочивается этот мир в полном соответствии с характеристиками исследуемой материальной системы. Следовательно, взятые вместе *пространство* и *время* образуют основу, на которой должны рассматриваться характеристики физических явлений. В этом смысле пространство и время, вместе взятые, играют роль, подобную той, какую играло одно отдельно взятое пространство в механике Ньютона. Это значит, что природа вещей описывается как некоторая «геометрическая» картина в пространстве и времени, отражаемая диаграммами Минковского.

В геометрии все три пространственных измерения равноценны (т. е. любые два измерения можно поменять местами путем поворота). Алгебраически поворот вокруг оси  $z$  на угол  $\alpha$  описывается уравнениями преобразования:

$$\begin{aligned}x &= x' \cos \alpha + y' \sin \alpha, \\y &= y' \cos \alpha - x' \sin \alpha.\end{aligned}\tag{27.1}$$

Если бы такого преобразования не существовало, едва ли можно было бы оправдать объединение трех измере-

ний в единое пространство — «континуум» (например, в произвольном графике, на одной оси которого откладывается такая физическая величина, как температура, а на другой — давление, подобное объединение невозможно). Тогда, естественно, возникает вопрос, не будет ли в «геометрии» взятых вместе пространства и времени подобного же объединения пространственных и временного измерений, так чтобы они образовали единый континуум. (Вспомним, что в механике Ньютона пространство и время не зависят друг от друга и, следовательно, подобного объединения произойти не может.)

Чтобы показать, что в теории относительности действительно имеет место *своеобразное* объединение пространства и времени, достаточно взять преобразование Лоренца, при котором координаты  $z$  и  $\tau$  выражаются через  $z'$  и  $\tau'$ . Это преобразование с очевидностью *подобно* повороту. Чтобы отчетливее выразить эту аналогию, введем *гиперболический угол*  $\beta$ , определяемый равенствами

$$\operatorname{sh} \beta = \frac{e^{\beta} - e^{-\beta}}{2} = \frac{v}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (27.2)$$

и

$$\operatorname{ch} \beta = \frac{e^{\beta} + e^{-\beta}}{2} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (27.3)$$

Тогда преобразование Лоренца запишется в виде

$$\begin{aligned} \tau &= \tau' \operatorname{ch} \beta - z' \operatorname{sh} \beta, \\ z &= z' \operatorname{ch} \beta - \tau' \operatorname{sh} \beta. \end{aligned} \quad (27.4)$$

Мы видим, что формулы преобразования (27.4) отличаются от формул преобразования поворота (27.1) прежде всего заменой тригонометрических функций  $\cos \alpha$  и  $\sin \alpha$  на гиперболические функции  $\operatorname{ch} \beta$  и  $\operatorname{sh} \beta$  и, кроме того, отрицательным знаком при *обоих*  $\operatorname{sh} \beta$ , тогда как в преобразовании (27.1) при одном из  $\sin \alpha$  стоит знак плюс, а при другом — минус. Тем не менее аналогия с преобразованием поворота является очень заметной, поэтому преобразование (27.4) называется *гиперболическим поворотом*.

Основное различие между тригонометрическим и гиперболическим поворотами состоит в том, что инвариант-

ными относительно этих преобразований являются разные функции. Так, при тригонометрическом повороте в плоскости  $xу$  инвариантна функция  $x^2 + y^2$ , описывающая квадрат длины, при гиперболическом повороте в плоскости  $z\tau$  инвариантна функция  $\tau^2 - z^2$ , которая отличается от квадрата длины тем, что здесь  $\tau^2$  и  $z^2$  входят с противоположными знаками, тогда как  $x^2$  и  $y^2$  имели один и тот же знак.

Если теперь перейти к рассмотрению трех пространственных измерений и одного временного, то из соотношения (9.7) мы увидим, что величина

$$s^2 = \tau^2 - x^2 - y^2 - z^2 = \tau'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 \quad (27.5)$$

является инвариантной как относительно произвольных преобразований Лоренца в пространстве и времени, так и относительно произвольных пространственных поворотов (равно как и при инверсии осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и  $\tau$ ). Сделаем более общее заключение: если взять два события с координатами  $x_1, y_1, z_1, \tau_1$  и  $x_2, y_2, z_2, \tau_2$ , то соответствующий инвариант, определяющий квадрат интервала между этими событиями, будет иметь вид

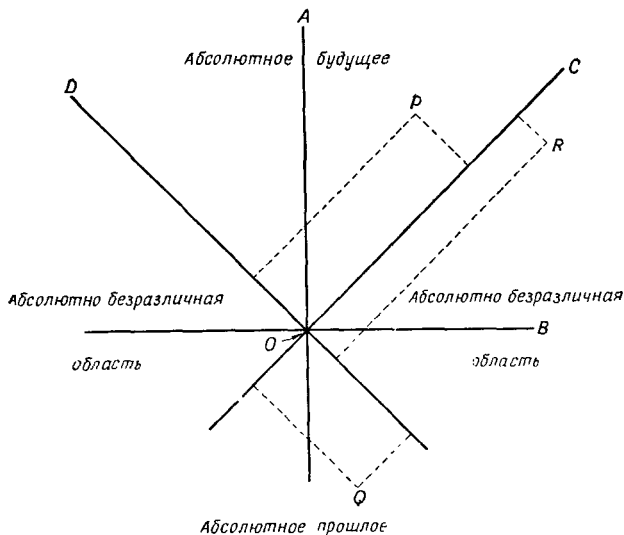
$$s^2 = (\tau_1 - \tau_2)^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2. \quad (27.6)$$

Легко видеть, что функция (27.6) является обобщением функции (11.3), описывающей квадрат длины, которой пользуются в обычном трехмерном пространстве. Выражение (27.6) применимо, однако, и в пространстве и во времени, так как координата  $\tau$  подвергается преобразованию Лоренца, являющемуся гиперболическим поворотом, а не обычным.

Все это указывает на то, что в релятивистской физике пространство и время объединены в четырехмерный континуум, в котором они способны переходить друг в друга таким образом, чтобы функция  $s^2$ , записанная в виде (27.6), оставалась инвариантной. Этот континуум называют *пространством-временем* — уже не «пространством и временем»: дефис подчеркивает, что речь идет о новом роде объединения.

Следует сказать, что, несмотря на внесенное теорией относительности описанное выше объединение пространства и времени, между ними сохраняется довольно

важное и специфическое различие, обязанное тому факту, что слагаемые  $(\tau_1 - \tau_2)^2$  и  $(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2$  входят в выражение инвариантного квадрата интервала  $s^2$  с *противоположными* знаками. Ввиду этого величина  $s^2$  может для различных пар событий



Фиг. 16.

принимать положительные, отрицательные и нулевые значения. Например, при  $s^2 = 0$  мы имеем световой конус, и ясно, что такой конус является границей между областями событий с положительными и отрицательными значениями  $s^2$ . Если на фиг. 16 одно из событий, а именно  $O$ , принять в качестве начала координат (для него  $x_2 = y_2 = z_2 = \tau_2 = 0$ ), то увидим, что для лежащего *внутри* светового конуса другого события  $P$  величина  $s^2$  положительна, тогда как для лежащего *снаружи* конуса события  $R$  она отрицательна. Но так как  $s^2$  — инвариант, то это означает, что *свойство события находиться внутри,*

снаружи или на световом конусе с вершиной в другом событии не зависит от выбора системы отсчета. Итак, хотя пространство и время до некоторой степени могут превращаться друг в друга при изменениях систем отсчета, такое превращение должно быть подчинено определенным ограничениям в том смысле, что интервал, лежащий внутри светового конуса, не может оказаться лежащим вне этого конуса или на самом конусе.

Простейшим случаем интервала внутри светового конуса будет интервал, для которого  $x=y=z=0$ . Этот интервал содержит лишь разность времен. При преобразовании Лоренца этот интервал переходит в интервал с новыми координатами  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  и  $t'$ , причем новые  $x'$ ,  $y'$  и  $z'$ , вообще говоря, отличны от нуля. Тем не менее квадрат интервала остается положительным, поскольку он является инвариантом. Поэтому интервалы, для которых  $s^2$  — положительная величина, называются «временно-подобными», так как в некоторых системах отсчета они будут содержать лишь разности времен для событий, происшедших в одном и том же месте пространства.

С другой стороны, простейшим случаем интервала вне светового конуса будет интервал, для которого  $t=0$ . Такой интервал, соответствующий событиям, разделенным лишь в пространстве, обладает отрицательным значением  $s^2$ . Если перейти к новой системе отсчета, то, вообще говоря,  $t'$  уже не будет равно нулю, однако  $s^2$  не изменится и останется поэтому отрицательным. Такие интервалы называются «пространственно-подобными», так как в некоторых системах отсчета они соответствуют одновременным событиям, разделенным пространственно.

Итак ясно, что, хотя пространственные и временная координаты могут комбинироваться друг с другом при изменении скорости системы отсчета, различие между пространственно-подобными и временно-подобными парами событий инвариантно и одинаково для всех наблюдателей. Точно так же инвариантны расположения событий на световом конусе, когда интервал между ними не пространственно-подобный и не временно-подобный. Таким образом, сохраняется некоторое тонкое различие

между пространством и временем (в смысле невозможности их *полной* перестановки местами при преобразованиях), несмотря на факт объединения пространства-времени в четырехмерный континуум. (Если бы координаты  $z$  и  $\tau$  было можно подвергнуть обычному тригонометрическому повороту, имела бы место *полная* эквивалентность пространства и времени, так как было бы можно просто поменять местами  $z$  и  $\tau$  подобно перемене местами  $x$  и  $y$  при повороте на  $90^\circ$ .)

Можно еще глубже продвинуться в понимании инвариантного различия между пространственно-подобными, временно-подобными и «нулевыми» (изотропными) интервалами (последние лежат на световом конусе, и для них  $s^2=0$ ). С этой целью мы будем измерять координаты  $u$  и  $v$  события  $P$  на диаграмме Минковского вдоль мировой линии светового луча. Это соответствует повороту на  $45^\circ$  в плоскости  $z\tau$ .

Мы получим тогда

$$\begin{aligned} u &= \frac{\tau - z}{\sqrt{2}}, & v &= \frac{\tau + z}{\sqrt{2}}, \\ uv &= \frac{\tau^2 - z^2}{2} = \frac{s^2}{2}. \end{aligned} \tag{27.7}$$

Поэтому при новом выборе осей инвариант  $s^2$  представляет собой *произведение*  $u$  и  $v$ . Так как для светового луча  $s^2=0$ , то для него будет выполняться либо равенство  $u=0$ , либо  $v=0$ . Уравнение  $u=0$  определяет линию  $OC$ , а уравнение  $v=0$  — линию  $OD$ .

Точка типа  $P$  (см. фиг. 16), лежащая внутри светового конуса и описывающая событие более позднее, чем  $O$ , обладает *положительными* координатами  $u$  и  $v$ . Напротив, точка  $Q$ , находящаяся внутри светового конуса и описывающая более раннее событие, чем  $O$ , обладает *отрицательными* координатами  $u$  и  $v$ . Точки вне светового конуса (например,  $R$ ) должны обладать *либо* положительным  $u$  и отрицательным  $v$ , *либо* отрицательным  $u$  и положительным  $v$ .

Как меняются координаты  $u$  и  $v$  при преобразовании Лоренца (27.4)? Произведем соответствующие под-

становки:

$$u = \frac{\tau - z}{\sqrt{2}} = \frac{(\operatorname{ch} \beta) \tau' - (\operatorname{sh} \beta) z' - (\operatorname{ch} \beta) z' + (\operatorname{sh} \beta) \tau'}{\sqrt{2}} = \\ = \frac{e^\beta}{\sqrt{2}} (\tau' - z') = e^\beta u', \quad (27.8)$$

$$v = \frac{\tau + z}{\sqrt{2}} = \frac{(\operatorname{ch} \beta) \tau' - (\operatorname{sh} \beta) z' + (\operatorname{ch} \beta) z' - (\operatorname{sh} \beta) \tau'}{\sqrt{2}} = \\ = \frac{e^{-\beta}}{\sqrt{2}} (\tau' + z') = e^{-\beta} v'. \quad (27.9)$$

Итак, при преобразовании Лоренца координаты  $u$  и  $v$  преобразуются особенно просто, причем каждая из них умножается на экспоненту  $e^\beta$  или  $e^{-\beta}$ . Эти множители обратны друг другу, так что произведение  $uv$  остается инвариантным. Особым случаем будет мировая линия светового луча, для которой в старых координатах  $u=0$  или  $v=0$ , а в новых координатах снова  $u'=0$  или  $v'=0$ , что непосредственно демонстрирует инвариантность величины скорости света.

Преобразование Лоренца, очевидно, оказывается теперь растяжением вдоль мировой линии одного светового луча в  $e^\beta$  раз, а вдоль мировой линии другого луча — сжатием во столько же раз (растяжением в  $e^{-\beta}$ ) раз. Если взять какой-нибудь элемент «площади» для пространства-времени, то ясно, что при таком преобразовании этот элемент подвергнется искому «сплющиванию» с «осями» сплющивания, соответствующими мировым линиям двух световых лучей. Так, вместо истинного (или тригонометрического) поворота пространственно-временное преобразование приводит к гиперболическому повороту, в действительности представляющему собой, как мы видели, «сплющивание» картины событий.

В описанном выше преобразовании «сплющивания» координаты  $u$  и  $v$  умножаются на экспоненты  $e^\beta$  и  $e^{-\beta}$ , которые всегда *положительны*. Отсюда следует, что разделение событий, лежащих внутри светового конуса, на более поздние и более ранние, чем  $O$ , инвариантно. Итак, мы охарактеризовали инвариантным образом не



только расположение событий внутри, вне или на световом конусе с вершиной  $O$ , но и то их инвариантное свойство, что они лежат в световом конусе будущего относительно  $O$  (совершаются позднее, чем событие  $O$ ) или в световом конусе прошлого относительно  $O$  (совершились ранее  $O$ ).

Подобным же образом легко видеть, что для событий, лежащих *на световом конусе*, также существует инвариантное различие между более ранними и более поздними событиями. Это связано с тем, что выполняется либо равенство  $u=0$ , либо равенство  $v=0$ , но вторая координата, отличная от нуля, должна быть положительной, если событие произошло позднее, чем  $O$ , и отрицательной, если оно произошло раньше  $O$ .

Напротив, для событий, лежащих *вне светового конуса* с вершиной в  $O$ , свойство быть позднее или раньше события  $O$  неинвариантно. Возвращаясь к фиг. 9, рассмотрим, например, событие  $B$ , одновременное с  $O$  в лабораторной системе отсчета. В системе отсчета наблюдателя  $\Omega_2$ , движущегося со скоростью  $v$  мимо лаборатории (мировая линия  $OE$ ), событием, одновременным с  $O$ , будет, например,  $B'$ , лежащее на отрезке  $OF$  и поэтому *не одновременное* с  $O$  в лабораторной системе отсчета. Если мы рассмотрим *все возможные* значения скорости  $v$ , то обнаружим, что *любую* точку вне светового конуса с вершиной в  $O$  можно рассматривать как одновременную событию  $O$  с позиций *некоторого* наблюдателя, причем для других наблюдателей, обладающих соответственно подобранными скоростями, эта же точка будет лежать либо в прошлом, либо в будущем относительно  $O$ . Итак, для событий, лежащих *внутри светового конуса* данного события, существует однозначный порядок следования во времени (в том смысле, что все наблюдатели будут согласны друг с другом в определении того, какое событие произошло раньше, а какое — позже, чем данное). Напротив, события, лежащие *вне светового конуса* с вершиной в данном событии, не упорядочены относительно этого события в своем следовании.

---

*Проблема причинности  
и наибольшая скорость  
распространения сигналов  
в теории относительности*

В предыдущей главе мы видели, что в случае двух событий, каждое из которых лежит вне светового конуса с вершиной в другом событии, разные наблюдатели, вообще говоря, не придут к согласию при определении, какое из событий произошло раньше, какое позднее. На первый взгляд могло бы показаться, что эта неопределенность может вызывать затруднения в установлении причинности. Ведь это трюизм, что если  $A$  есть причина  $B$ , то  $A$  должно произойти либо раньше, чем  $B$ , либо одновременно с  $B$ . Событие, которое ожидается завтра, не может быть причиной того, что уже случилось сегодня. Мы говорим так на том основании, что под причиной события  $B$  мы понимаем одно из условий  $A$ , которое, уже будучи в наличии и в действии, вызывает появление  $B$ . Так, горящий сейчас огонь может вызвать взрыв каких-то взрывчатых веществ сейчас, но огонь, который будет гореть завтра, такого взрыва сейчас вызвать не может.

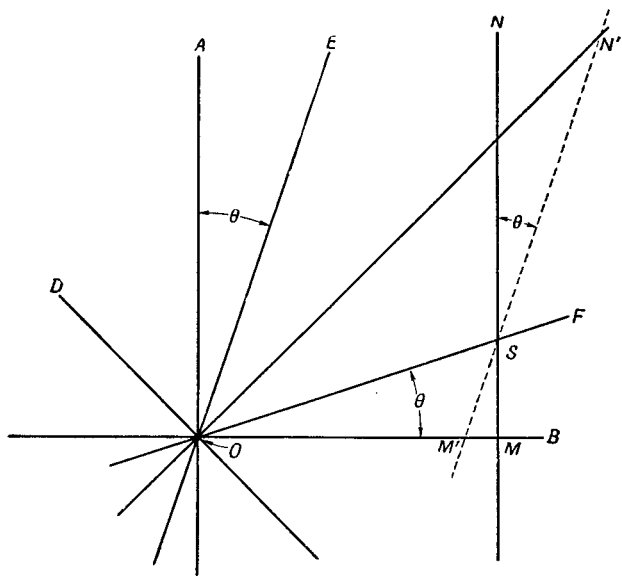
Кажется ясным, что если было бы можно изменить порядок прошлого, настоящего и будущего совершенно произвольным образом, то получился бы нелепый результат как в физике, так и в повседневной жизни. Допустим, например, что один наблюдатель видит, как за горением какого-нибудь топлива *следует* нагревание воды, а для другого наблюдателя сначала нагревается вода, а уж топливо загорается позднее. Или пусть один наблюдатель сначала проголодался и затем утолил свой голод едой, а другой наблюдатель был сыт, потом поел и тут же стал голодным. Можно было бы сколь угодно долго продолжать эти примеры, из которых отчетливо

следует, что мы не смогли бы понять мир, если бы мы могли произвольно изменять последовательность событий во времени. Поэтому необходимо проверить, не приведет ли к нелепостям в отношении проблемы причины и следствия релятивистская неопределенность упорядоченности во времени событий, лежащих вне светового конуса некоторого наблюдателя.

Отвечая на этот вопрос, мы напомним сначала, что, как это уже говорилось в гл. 14, никакой объект не может двигаться, а воздействие, сила и пр. передаваться каким-либо иным способом со скоростью, большей, чем скорость света  $c$ . Тогда легко видеть, что пока это условие выполняется, релятивистская неопределенность упорядоченности событий во времени не вносит путаницы в проблему причинности. Так, если событие  $A$  должно быть причиной другого события  $B$ , то между ними должно иметь место некоторое физическое взаимодействие или контакт. (Если же такой физической связи вообще нет, то одно событие не может быть причиной или следствием другого.) Однако если такое физическое воздействие распространяется со скоростью, не превышающей световую, то любые два причинно связанные друг с другом события, как было показано в предыдущей главе, имеют единственный и однозначный порядок следования во времени. Иными словами, если событие  $A$  предшествует своему следствию  $B$  по данным одного наблюдателя, то такая же взаимосвязь будет иметь место и для всех других наблюдателей. Поэтому порядок причины и следствия инвариантен, так что никакой путаницы в этом порядке не возникнет, когда разные наблюдатели рассматривают (каждый в своей системе отсчета) одну и ту же систему событий.

Напротив, если бы какое-то воздействие могло распространяться со скоростью, большей скорости света, то представления о последовательности причины и следствия полностью бы перепутались. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим такой крайний случай, когда считается, что физические воздействия могут распространяться с бесконечно большими скоростями, так что два удаленных друг от друга наблюдателя могут мгновенно связаться друг с другом. Изобразим одного из

них,  $\Omega_1$ , мировой линией  $OA$  (фиг. 17), а другого,  $\Omega_3$ , движущегося с той же скоростью, мировой линией  $MN$ . Согласно нашей гипотезе, наблюдатель  $\Omega_1$  в момент времени, соответствующий событию  $O$ , может вступить мгновенно в физический контакт с другим наблюдателем  $\Omega_3$



Фиг. 17.

в момент времени, соответствующий событию  $M$ . Пусть эти наблюдатели, например, используют такой контакт для посылки сигналов друг другу.

Если бы при этом не учитывался принцип относительности и постоянство величины скорости света, наша гипотеза не привела бы к логическим внутренним противоречиям. Действительно, она просто соответствует представлениям «здравого смысла» о том, будто все, что мы видим в данный момент, находится в мгновенном контакте с нами, и все это произошло в одно и то же время, которое мы называем «теперь».

Перейдем, однако, к рассмотрению дальнейших следствий из принципа относительности, развитого Эйнштейном, который гласит, что законы физики имеют один и тот же вид для *всех* наблюдателей и что для всех наблюдателей скорость света имеет одну и ту же величину. Как мы уже знаем, отсюда следует, что два наблюдателя, движущиеся относительно друг друга, не придут к согласию в вопросе о том, какую систему событий считать одновременной. Так, наблюдатель  $\Omega_2$ , описываемый мировой линией  $OE$ , будет считать одновременными событию  $O$  все события, лежащие на прямой  $OF$ , тогда как наблюдатель  $\Omega_1$  (мировая линия  $OA$ ) считает одновременными события, лежащие на линии  $OB$ . Однако, согласно принципу относительности, все общие законы природы, выполняющиеся в системе отсчета  $\Omega_1$ , выполняются и в системе отсчета  $\Omega_2$ . Поэтому если предположить, что наблюдатель  $\Omega_1$  может установить контакт с событием  $M$ , которое одновременно с  $O$  в *его* системе отсчета, то движущийся относительно него наблюдатель  $\Omega_2$  может находиться в контакте с событием  $S$ , одновременным с  $O$  в системе отсчета *этого второго* наблюдателя.

Перейдем теперь к наблюдателю  $\Omega_3$  с мировой линией  $MN$ . В момент времени, соответствовавший событию  $S$ , его мировая линия пересекалась с мировой линией наблюдателя  $\Omega_4$  (мировая линия  $M'N'$ ), движущегося с той же скоростью, что и наблюдатель  $\Omega_2$ . Находясь в одной и той же точке  $S$ , но двигаясь с разными скоростями, оба наблюдателя могут, очевидно, установить друг с другом действительно мгновенную связь, так что для распространения сигнала между ними не требуется никакого времени (или пренебрежимо малое). Поэтому, согласно принципу относительности, у наблюдателя  $\Omega_4$  будет такая же возможность мгновенно связаться с наблюдателем  $\Omega_2$  в точке  $O$  (эта точка и точка  $S$  одновременны в *его* системе отсчета), как и наблюдателю  $\Omega_1$  мгновенно сигнализировать  $\Omega_3$ , находящемуся в точке  $M$ . Тогда наблюдатель  $\Omega_2$  смог бы послать сигнал наблюдателю  $\Omega_1$  в точку  $O$ , а  $\Omega_1$  смог бы передать сигнал наблюдателю  $\Omega_3$  в точку  $M$  (которая одновременна с  $O$  в системе отсчета наблюдателей  $\Omega_1$  и  $\Omega_3$ ).

По такой цепочке сигналов было бы можно связаться из точки  $S$  с точкой  $M$ , и наоборот. Но ведь точка  $M$  находится в *прошлом* по отношению к  $S$ . Итак, точка  $S$  могла бы связаться с ее собственным прошлым — точкой  $M$ , например сообщить своему прошлому, что совершится в будущем. Узнав об этих предстоящих событиях, наблюдатель в  $M$  мог бы изменить свои намерения и поступить по-другому, так что его будущее в точке  $S$  стало бы иным, чем его будущее «я» ему предсказывало. Например, прежнее «я» могло бы предпринять что-нибудь такое, в результате чего станет в будущем невозможной посылка сигнала. Так мы приходим к внутреннему логическому противоречию.

Обобщая приведенное выше рассуждение, легко показать, что такое же противоречие возникнет, если допустить возможность передачи физических воздействий с любой скоростью, большей, чем скорость света.

Мы видим, что если мы принимаем теорию относительности Эйнштейна, то она приводит к абсурдности предположения о том, что передача каких бы то ни было физических воздействий может осуществляться с помощью сигналов, распространяющихся со скоростью, большей скорости света. Другими словами, либо мы должны считать, что невозможно распространение физического воздействия со скоростью, большей скорости света, либо должны отказаться от эйнштейновской формулировки принципа относительности. Но именно эта формулировка принципа относительности до сих пор подтверждалась фактами. К тому же, как мы уже знаем, никто и никогда не наблюдал передачи физических воздействий со скоростью, большей чем скорость света (так, например, материальные объекты не могут быть ускорены и до скорости света, так как на это требовалось бы затратить бесконечно большое количество энергии; неизвестны и такие поля, которые переносили бы воздействие со скоростями, большими чем скорость света). Конечно, теория Эйнштейна, как и все другие теории, может быть в принципе опровергнута при распространении опыта за границы ее применимости. Но пока мы остаемся в области, где эта теория справедлива (а пока все известные эксперименты находятся внутри нее!),

физические воздействия, распространяющиеся со скоростью, большей скорости света, невозможны.

По отношению к данному событию  $O$  любое другое событие  $P$ , как мы уже видели, оказывается находящимся в одной из трех специфических областей пространства-времени, которые инвариантным образом отличаются друг от друга (см. фиг. 16). Если это второе событие находится внутри светового конуса или лежит на нем, то оно является прошлым или будущим относительно события  $O$ . Так как это расположение не зависит от выбора системы отсчета, можно сказать, что оно в известном смысле «абсолютно» (по крайней мере в области применимости теории Эйнштейна). «Передний» световой конус с вершиной в точке  $O$ , включающий все события, лежащие внутри него, нужно тогда называть «абсолютным будущим» по отношению к событию  $O$ . Соответствующий «задний» световой конус вместе со всеми лежащими внутри него событиями называется «абсолютным прошлым»  $O$ . Область вне этих световых конусов можно называть «абсолютно безразличной» для  $O$ <sup>1)</sup>, так как эта область вообще не может непосредственно взаимодействовать с событием  $O$  и поэтому в сущности безразлична для него. Так, наблюдая далекую звезду, мы **вступаем** в контакт лишь с тем, чем эта звезда когда-то давно *была*. Предположение, что эта звезда *существует* и «теперь», — лишь правдоподобно и основано только на наших общих знаниях о свойствах звезд. В действительности же мы *не знаем*, существует ли эта звезда «теперь». Например, она уже могла взорваться, и *позднее* мы (или другие наблюдатели) обнаружим этот взрыв. Однако то, что происходит со звездой именно «теперь», относится к абсолютно безразличной относительно нас области, с которой «теперь» мы принципиально не можем вступить в контакт. (Позже нас будет изображать ведь другая точка нашей миро-

<sup>1)</sup> В английском подлиннике: «absolute elsewhere», что в буквальном переводе означает «абсолютное где-нибудь»; переводчик не решился вводить такой термин и предложил другой (хотя, может быть, и не лучший): «абсолютно безразличная область». — *Прим. перев.*

вой линии, не совпадающая с той, которая изображает нас теперь.)

Когда два события лежат друг для друга в «абсолютно безразличной» области, так что они не могут иметь физический контакт, то все равно, считать ли одно из них более ранним или более поздним. Их порядок во времени чисто условен в том смысле, что его можно выбирать так, как это нам удобно, лишь бы это делалось последовательным образом. Как мы уже видели, движущиеся с разными скоростями наблюдатели, которые вычисляют поправку для времени  $\Delta t$  из тех соображений, что свету это время требуется, чтобы пройти расстояние  $r$  (формула  $\Delta t = r/c$ ), по-разному определяют принадлежность событий (по отношению к некоторому событию, происшедшему в непосредственной окрестности наблюдателя) к прошлому, будущему, либо обнаруживают их одновременность. Однако пока отсутствует физический контакт, являющийся основой причинных взаимосвязей между событиями, несущественно, как мы будем упорядочивать эти события во времени. Напротив, как здесь было показано, если такой причинный контакт возможен, порядок следования событий оказывается однозначным, так что преобразования Лоренца никогда не приведут к нарушению последовательности причины и следствия.

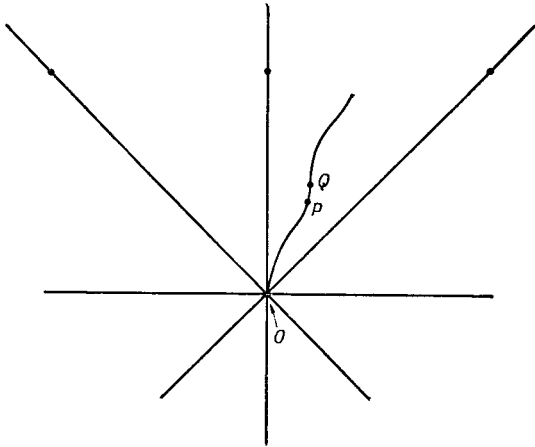


---

### *Собственное время*

До сих пор мы обсуждали следствия специальной теории относительности, справедливые для наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью. Как это было отмечено ранее (гл. 16), принцип относительности невозможно корректно применять в системе отсчета ускоренно движущегося наблюдателя, если мы остаемся в области применимости специальной теории относительности. Иными словами, чтобы законы выражались одними и теми же соотношениями (т. е. имели одинаковый вид) даже в ускоренных системах отсчета, необходимо расширить концептуальные основы нашей теории и обратиться к общей теории относительности. Тем не менее это не означает, что специальная теория относительности вообще не может сделать никаких предсказаний о том, что будет происходить с ускоренно движущимися наблюдателями. Это лишь означает, что если нам понадобятся такие предсказания, то следует исходить из позиций неускоренно движущегося наблюдателя при формулировке основных законов физики. Исходя из таких позиций, мы можем *в любой момент* подвергнуть свои выводы преобразованию, для того чтобы увидеть, к чему они приводят с точки зрения наблюдателя в ускоренно движущейся системе отсчета. (Аналогичный подход действительно развивается в механике Ньютона, законы которой записываются первоначально в инерциальной системе, но затем их можно перевести на язык ускоренной системы, что влечет за собой появление в уравнениях движения дополнительных слагаемых типа силы Кориолиса и центробежной силы.)

Чтобы изучить этот вопрос, заметим сначала, что в системе отсчета наблюдателя, движущегося с постоянной скоростью, его ускоренно движущийся коллега изображается с помощью искривленной мировой линии (фиг. 18), лежащей целиком внутри светового конуса с



Фиг. 18.

вершиной в любой точке  $O$ , в которой побывал ускоренно движущийся наблюдатель. Возьмем теперь некоторую фиксированную точку  $P$  на его мировой линии и близкую к ней точку  $Q$  на этой же линии. Если эти две точки достаточно близки друг к другу, то можно приближенно выразить ход кривой дифференциалами координат

$$t_Q - t_P = dt \quad \text{и} \quad z_Q - z_P = dz.$$

Пусть в точке  $P$  скорость ускоренно движущегося наблюдателя равна  $v$ , а в точке  $Q$  она равна  $v + dv$ .

Основным понятием, позволяющим распространить выводы специальной теории относительности на ускоренные системы отсчета, является понятие *локально сопутствующей неускоренной системы отсчета*. Чтобы

разъяснить смысл этого понятия, рассмотрим сначала точку  $P$ , где наблюдатель обладает скоростью  $v$ . Этот наблюдатель, по нашему предположению, движется ускоренно. Можно, однако, представить себе находящегося в точке  $P$  наблюдателя, движущегося с постоянной скоростью  $v$ . При введении такого наблюдателя важно, что в течение достаточно короткого периода времени  $dt$  скорость ускоренно движущегося наблюдателя относительно сопутствующего ему неускоренно движущегося наблюдателя будет порядка  $dv$ , т. е. весьма мала. Как мы уже видели, при малых скоростях теория Ньютона является предельным случаем теории Эйнштейна. Поэтому, по крайней мере в течение некоторого времени  $dt$ , движение системы может описываться с помощью законов Ньютона, применяемых в системе отсчета, движущейся с постоянной скоростью  $v$ . Выводы, полученные на основании этих законов, можно перевести на язык лабораторной системы отсчета, применив преобразование Лоренца. Когда же  $dv$  достигнет заметной величины, нам нужно будет просто перейти к другой системе отсчета, скорость движения которой постоянна и равна  $v + dv$ , и т. д. Рассмотрев, таким образом, ряд сопутствующих систем отсчета, можно узнать, что будет наблюдаться в лабораторной системе отсчета, скорость которой не изменялась. Для этого достаточно применить последовательно преобразования Лоренца. Можно, наоборот, использовать подобную же процедуру, исходя из результатов наблюдений в лабораторной системе отсчета, и вычислить результаты наблюдений сопутствующего наблюдателя в каждый данный момент времени.

Важным примером описанной выше процедуры является вычисление так называемого «собственного времени», которое измеряют часы, движущиеся ускоренно и изображаемые некоторой мировой линией, например  $OPQ$ . В ходе таких расчетов мы воспользуемся только что описанным методом, т. е. будем рассматривать эти часы в течение достаточно короткого промежутка времени  $dt$  (пока относительная скорость  $dv$  весьма мала) с точки зрения сопутствующей системы отсчета. При этом к ним приложима механика Ньютона, утверждающая, что ход исправно действующих часов не зависит

от того, как мы их ускоряем. Тогда в течение промежутка времени  $dt$  наши часы измерят интервал времени  $dt_0$ , связанный с  $dt$  преобразованием Лоренца от сопутствующей часам системы отсчета к лабораторной системе. Эту же взаимосвязь особенно просто получить, исходя из инвариантной величины

$$ds^2 = c^2 (dt)^2 - (dz)^2. \quad (29.1)$$

В сопутствующей системе отсчета  $dt' = dt_0$  и  $dz' = 0$ , так как в этой системе часы покоятся. Поэтому  $ds^2 = c^2 dt_0^2$  и

$$\begin{aligned} \frac{ds^2}{c^2} &= dt_0^2 = (dt)^2 - \frac{1}{c^2} (dz)^2, \\ \frac{dt_0}{dt} &= \sqrt{1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}. \end{aligned} \quad (29.2)$$

Отрезок «собственного времени»  $\Delta t_0$ , измеренный ускоренно движущимися часами при их движении от  $t_1$  до  $t_2$ , можно тогда найти путем интегрирования формулы (29.2):

$$\Delta t_0 = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - \left(\frac{v(t)}{c}\right)^2} dt. \quad (29.3)$$

Эту формулу легко распространить на случай трех пространственных измерений, так как она остается справедливой и при замене  $v^2$  квадратом трехмерной скорости:  $v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ .

Из формулы (29.3) видно, что в силу неравенства  $\sqrt{1 - (v/c)^2} \leq 1$  время, измеренное движущимися относительно данной системы отсчета часами, вообще говоря, меньше того промежутка времени, который покажут часы, неподвижные в этой системе отсчета.

---

*«Парадокс» близнецов*

На основании результатов предыдущей главы мы можем теперь проанализировать один известный кажущийся парадокс, к которому приводит теория относительности.

Возьмем двух «одинаковых» близнецов. Пусть один из них предпримет путешествие в космическом корабле, который может развивать скорость, близкую к скорости света, а другой останется на Земле. При возвращении путешествовавшего близнеца на Землю часы в его космическом корабле покажут, что прошел промежуток времени, равный

$$\Delta t_0 = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - \left(\frac{v(t)}{c}\right)^2} dt,$$

тогда как часы той же конструкции у близнеца, оставшегося на Земле, отметят, что прошел промежуток времени  $t_2 - t_1 > \Delta t_0$ . Мы видели, однако, раньше, что то же самое преобразование Лоренца, которое применяется к часам, должно быть применено и к ходу всех физических, химических, нервных, психологических и пр. процессов. Поэтому побывавший в путешествии близнец во всех отношениях прожил более короткий отрезок времени, чем тот, кто оставался на Земле<sup>1)</sup>. При этом,

---

<sup>1)</sup> Дело обстоит не так просто. Здесь необходимо учесть техническую выполнимость, биологические особенности, правомерность перехода к неинерциальным системам, гравитационные эффекты. — *Прим ред.*

если скорость космического корабля была близка к скорости света, такая разница времен может оказаться весьма значительной. Может, например, случиться так, что для остававшегося на Земле брата прошло 20 лет, а для путешествовавшего в космическом корабле — всего год или два.

Перед тем, как начать обсуждение смысла полученного вывода, отметим, что он не нарушает принципа относительности, утверждающего, что законы физики должны представлять собой соотношения одного и того же вида независимо от того, как движется система отсчета. Но мы (как указывалось в предыдущей главе) ограничиваемся здесь специальной теорией относительности, в которой законы физики инвариантны лишь для наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью. Очевидно, что выводы этой теории не могут равным образом применяться в системах отсчета обоих наблюдателей-близнецов, так как один из них подвергается ускорению, а другой — нет. По этой причине мы не имеем права менять наблюдателей местами и говорить, например, что наблюдатель в космическом корабле в равной мере обнаруживает, что его брат, оставшийся в лаборатории, меньше состарился. Напротив, поскольку мы остаемся в области применимости специальной теории относительности, то должны придавать инерциальной системе отсчета исключительную роль при выражении законов физики. Этим и объясняется тот факт, что при встрече два брата-наблюдателя, совершавшие неодинаковое движение, обнаружат, что для них прошли и разные промежутки времени.

Чтобы получить законы, имеющие одинаковый вид как в ускоренной, так и в неускоренной системах отсчета, необходимо перейти к общей теории относительности. Для этого следует, однако, ввести *гравитационное поле*. Как показал Эйнштейн, в ускоренной системе отсчета должны обнаруживаться новые эффекты, эквивалентные тем, которые вызываются гравитационным полем. Именно с точки зрения ускоренно движущегося наблюдателя можно сказать, что появляется эффективное дополнительное гравитационное поле, действующее на все его окружение — на звезды, планеты, Землю и т. д., — чем и

объясняется их ускорение относительно космического корабля.

Согласно общей теории относительности, двое часов, расположенных в областях с разными значениями гравитационного потенциала, должны иметь разную скорость хода. Если наблюдатель в космическом корабле будет пользоваться теми же законами общей теории относительности, что и наблюдатель, оставшийся на Земле, но учтет другие значения гравитационного потенциала, соответствующие его собственной системе отсчета, то он предскажет расхождение хода часов у себя и на Земле. Как показывают дальнейшие расчеты, он придет к тем же выводам о различии истекшего времени, что и наблюдатель на Земле (для которого законы общей теории относительности сведутся к законам специальной теории относительности, так как он не испытывает ускорения). Поэтому разная скорость «старения» братьев-близнецов нисколько не противоречит принципу относительности, если только пользоваться общей теорией относительности, приложимой к ускоренным системам отсчета.

Почему же эффект неодинакового старения братьев-близнецов кажется парадоксальным для большей части людей, когда они впервые о нем слышат? Главная причина этого — в привычном образе мыслей, когда мы произвольно считаем все, одновременно присутствующее в нашем восприятии, случившимся в одно и то же время, именуемое «теперь». Так, глядя на звезды в ночном небе, мы не можем удержаться от представления, будто весь этот небосвод существует «теперь», одновременно с актом нашего восприятия. В результате мы уже почти совершенно естественно приходим к мысли, что при выходе ракеты в космос можно продолжать следить за ней непосредственно и вообще сохранять с ней мгновенную связь, сравнивая каждое происходящее на ней событие (скажем, ход часов) с соответствующим событием, имеющим место в то же самое время у нас. Для возвратившейся ракеты должно пройти, казалось бы, то же самое время, что и для нас, как это реально имеет место для всех привычных нам систем (хотя последние, конечно,

движутся со скоростями, гораздо меньшими по сравнению со скоростью света).

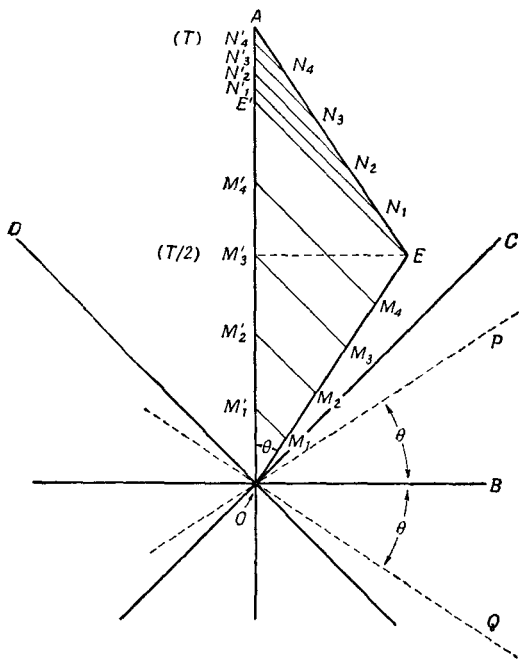
Но мы, конечно, уже отлично знаем, что все, наблюдаемое на почном небе, в действительности происходит не в тот же самый момент, когда мы это воспринимаем, — напротив, все это давным-давно прошло и миновало (мы видим, например, далекие туманности такими, какими они были сотни миллионов лет или более назад). Более того, мы определяем, *когда* на самом деле произошло то, что мы видим, с помощью соотношения  $\Delta t = r/c$ , т. е. учитываем время, потребовавшееся свету, чтобы дойти до нас. Но, как это выяснилось в предыдущих главах, величина такой поправки будет различной для разных наблюдателей в зависимости от того, с какими скоростями они движутся. В результате теряет смысл и привычное для нас отнесение каждого события к одному какому-то однозначно определенному времени. Если же для удаленных событий не имеется однозначно определенного времени их появления, которое было бы одним и тем же при всех методах его измерения, то уже нет оснований и для предположения, будто при удалении друг от друга двух наблюдателей и их последующей встрече пережитый ими отрезок времени одинаков.

Чтобы отчетливее увидеть, в чем состоит трудность, с которой сталкиваются наши интуитивные представления об одновременности, посмотрим, что в действительности случилось бы, если бы каждый наблюдатель систематически посылал другому световые или радиосигналы (например, один раз в секунду), измеряя время по собственным часам. Тогда каждый наблюдатель мог бы «увидеть», как течет время у другого, так что, вероятно, смог бы проверить, как это каждый из них может прожить «в одно и то же время» разные отрезки времени.

Начнем это обсуждение с того, что увидит наблюдатель, оставшийся в своей лаборатории. Для простоты предположим, что космический корабль сначала ускоряется до скорости  $v$  за такой короткий промежуток времени, что ускорение можно считать практически мгновенным. Пусть этот космический корабль улетает от лаборатории с постоянной скоростью  $v$  в направлении оси  $z$  и летит так в течение времени  $T/2$ , если его



измерять по часам в лабораторной системе отсчета. По истечении этого времени вновь включаются двигатели и придают кораблю обратную скорость  $-v$ . Путешествие продолжается еще в течение промежутка времени



Фиг. 19.

$T/2$ , пока космический корабль не вернется на Землю и не будет здесь быстро заторможен, приняв скорость, равную скорости движения Земли. (Предположение о мгновенном изменении скорости не изменяет сути задачи и выводов<sup>1)</sup>.) Мировая линия космического ко-

<sup>1)</sup> Можно утверждать, что такое предположение определенно меняет «суть задачи» и «выводы», влияя на интеграл, определяющий  $\Delta t_0$ . — Прим. ред.

рабля изображена на диаграмме Минковского (фиг. 19) как  $OEA$ . Периодически посылаемые движущимся наблюдателем световые сигналы обозначены отрезками  $M_1M'_1$ ,  $N_1N'_1$  и т. д.

Первоначально наблюдатель в лаборатории (мировая линия  $OA$ ) будет принимать сигналы в точках  $M'_1$ ,  $M'_2$ ,  $M'_3$  и т. д., расположенных реже, чем соответствующие точки на мировой линии ракеты вследствие эффекта Допплера [релятивистская формула (17.12)]<sup>1)</sup>. Если  $\tau_0$  — период для часов на космическом корабле, по которому задается частота сигналов, то регистрируемое в лаборатории время  $\tau_1$  между соседними сигналами равно (так как  $\theta=0$ )

$$\tau_1 = \tau_0 \frac{v_0}{v_1} = \tau_0 \frac{1 + (v/c)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (30.1)$$

Позднее же, когда после мировой точки  $E$  космический корабль приобрел скорость, обратную исходной, он стал приближаться к лаборатории, и сигналы, посланные с него после  $E$ , стали приходить чаще:

$$\tau_2 = \tau_0 \frac{v_0}{v_2} = \tau_0 \frac{1 - (v/c)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (30.2)$$

Так как скорость удаления космического корабля от лаборатории равна скорости его приближения к ней, то очевидно, что на своем обратном пути корабль отправит то же число сигналов  $N/2$ , какое он отправил при своем удалении ( $N$  — число сигналов, посланных в течение всего путешествия).

Чтобы принять все эти сигналы, наблюдателю в лаборатории понадобилось бы время, равное

$$\frac{N}{2} \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \left( 1 + \frac{v}{c} + 1 - \frac{v}{c} \right) = \frac{N\tau_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (30.3)$$

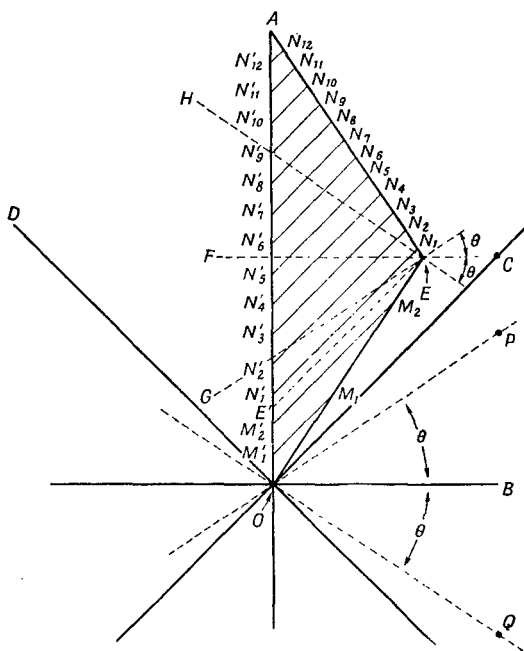
Отсюда, как и следовало ожидать, видно, что период, за который в лаборатории были приняты все сигналы, превышает тот период  $N\tau_0$ , за который они были отправлены с точки зрения наблюдателя, путешествующего на космическом корабле.

<sup>1)</sup> Те же выводы можно было бы получить, пользуясь методом коэффициента  $k$ , развитым в гл. 26.

Здесь важно заметить, что наблюдатель, остававшийся в лаборатории, не имеет возможности непосредственно узнать, как течет время у наблюдателя на ракете, так как поступающие к нему сигналы искажены эффектом Доплера. Иначе говоря, в лабораторной системе отсчета непосредственному наблюдению поддается сначала набор сигналов, поступающих редко, а затем другой набор сигналов, поступающих часто (если бы, например, можно было непосредственно наблюдать самого путешествующего наблюдателя, то казалось бы, что его жизненные процессы были сначала замедлены, а затем ускорены). Наблюдатель в лаборатории может учесть «поправку» на удаление ракеты или ее приближение лишь путем *вычислений*. При этих вычислениях он принимает скорость света равной  $c$ . Но ведь, как мы видели, скорость света равна  $c$  для всех наблюдателей, так что наблюдатели, движущиеся с разными скоростями, будут учитывать и разные поправки. Поэтому брат-близнец, остающийся в лаборатории, считает одновременными наборы событий на прямых, параллельных  $OB$ , тогда как его брат на ракете сначала считает одновременными наборы событий на прямых, параллельных  $OP$ , пока он не достигает поворотной точки  $E$ , а затем он считает одновременными наборы событий на прямых, параллельных  $OQ$ . Поэтому, когда брат, летящий на ракете, переходит из точки  $M_3$  в точку  $M_4$ , он фиксирует другой промежуток времени, в течение которого это происходит, чем его брат в лаборатории, так как один из них принимает за нулевой момент наклонную линию  $OP$ , а другой — горизонтальную линию  $OB$ . После того, как ракета претерпела в точке  $E$  ускорение, брат-путешественник принимает за нулевой момент уже другую наклонную линию  $OQ$ . Отсюда видно, что есть все основания для того, чтобы часы обоих братьев отметили разную величину прошедших отрезков времени с того момента, как братья расстались друг с другом, и до момента их последующей встречи.

Новая сторона той же проблемы откроется, если рассмотреть, как воспринимает наблюдатель на ракете световые сигналы, которые посылает ему регулярно наблюдатель из лаборатории (фиг. 20). Вследствие эффекта

Допплера импульсы, отправленные между точками  $O$  и  $E'$ , будут приняты на космическом корабле с растянутыми промежутками между ними в моменты между  $O$  и  $E$ . Импульсы же, посланные между  $E'$  и  $A$ , будут приняты в учащенном темпе.



Фиг. 20.

Непосредственно перед тем как приобрести в точке  $E$  ускорение, наблюдатель в космическом корабле будет считать одновременными с  $E$  все события, лежащие на прямой  $EG$ , параллельной  $OP$ . Сразу же после того, как установилась новая скорость, он станет считать одновременными с  $E$  все события, лежащие на новой прямой  $EH$ , параллельной теперь  $OQ$ . Мы видим, что временная координата, приписываемая данному событию,

претерпевает неожиданный скачок в момент ускорения, после которого (точка  $E$ ) такому событию, как, например,  $N'_4$ , приписывается меньшая величина временной координаты, чем до ускорения; это изменение соответствует расстоянию между точками пересечения линии  $AO$  с линиями  $EH$  и  $EG$ . Именно благодаря такому скачку временной координаты, которую мы приписываем событиям, появляется возможность передать от наблюдателя в лабораторию наблюдателю в ракете большее число сигналов, чем каким-либо другим путем, хотя оба наблюдателя пользуются часами одной и той же конструкции. Так как этот скачок имеет место лишь в системе отсчета, связанной с космическим кораблем, но его нет в лабораторной системе отсчета, то ясно, что положение наших двух наблюдателей несимметрично.

Если бы наблюдатель в ракете мог видеть наблюдателя в лаборатории, то ему показалось бы, что жизненные процессы последнего сначала замедлились, а затем ускорились, но по прошествии всего времени своего полета он обнаружил бы, что преобладало ускоренное протекание этих процессов, а не замедленное. Поэтому его не удивит открытие, что он встретит своего брата-близнеца, прожившим более длительный срок, чем он сам.

Таким образом, мы не обнаруживаем ничего по-настоящему парадоксального в том выводе из теории относительности, что ускоренные часы отметят меньший промежуток времени при прохождении между двумя точками, чем неускоренные часы (также между теми же точками). Возможность этого проистекает из того факта, что в теории относительности время не абсолютно, в нем нет универсального момента «теперь», который был бы одинаковым для всех сосуществующих наблюдателей. Понятие времени оказалось гораздо тоньше, и оно может быть неодинаково в разных системах отсчета. Могут сосуществовать разнообразные времена, регистрируемые часами или с помощью каких-либо физических процессов.

Физическое время стало во многих отношениях проявлять качества, которые мы замечали за временем в своем непосредственном восприятии. Например, мы знаем, что

один и тот же (по данным наших физических часов) промежуток времени может нам представляться долгим или быстротечным, вечностью или просто мигом в зависимости от того, сколько событий совершилось в течение него. (В § 3 приложения мы подробнее остановимся на проблеме восприятия времени.) Пока еще не была развита теория относительности, казалось, что физическое или хронологическое время не имеет ничего общего с относительностью и не зависит от условий (абсолютно). Теперь нам ясно, что такое представление происходило от того, что исследовалась лишь ограниченная область малых скоростей. Как только эта область расширилась и включила в себя скорости, по величине сравнимые со скоростью света  $c$ , мы столкнулись с фактом зависимости хронологического времени от условий опыта, что не столь уж мало схоже с тем, что мы ощущаем в непосредственных восприятиях. Другими словами, все виды времени, включая хронологическое время и субъективно ощущаемое время, — это способы упорядочения реальных событий и измерения относительной длительности процессов. Представление о том, что якобы существует одно-единственное универсальное упорядочение и мера длительности — время, — это всего лишь привычный способ мышления, основывающийся на ограниченной области, в которой действует механика Ньютона. В этой области такое представление справедливо, однако при распространении за ее пределы оно становится несостоятельным. Возможно, что при дальнейшем расширении области применения понятия времени нам придется изменить и обогатить еще больше наши представления о времени (и о пространстве). Мы должны быть готовы даже к их коренному изменению, при котором самые обычные релятивистские представления окажутся предельными случаями или приближениями новых будущих представлений.

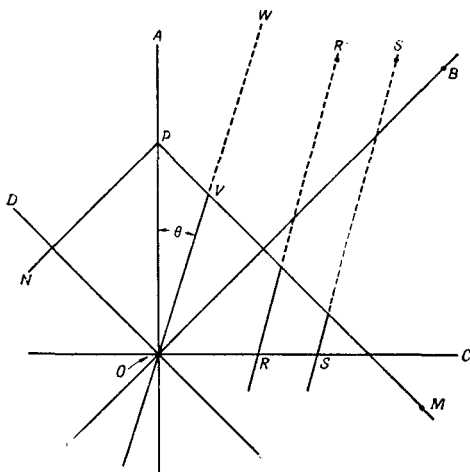
---

*Реконструкция прошлого  
как сущность диаграмм  
Минковского*

Когда теория относительности объединила пространство и время в единый четырехмерный пространственно-временной континуум, это породило тенденцию понимать диаграммы Минковского как изображение арены или поля действия, которое наблюдатель может увидеть все сразу. Иначе говоря, имеется тенденция почти произвольно занять позицию такого «наблюдателя», который, так сказать, стоял бы вне пространства и времени, обозревая Вселенную от начала и до конца не только в пространстве, но и во времени, подобно тому, как летящий на самолете человек обозревает раскинувшийся под ним ландшафт. При этом хочется представлять себе мировые линии других наблюдателей как пути, по которым движутся эти наблюдатели, как двигался бы по своим рельсам поезд, когда его наблюдают с самолета.

Однако небольшое размышление показывает, что подобный взгляд на диаграмму Минковского не имеет ничего общего с действительностью. Возьмем, например, покоящегося относительно лаборатории наблюдателя, мировая линия которого на фиг. 21 обозначена как *OA*. В каждый момент этот наблюдатель изображается на диаграмме точкой, например *P*. Этот наблюдатель не может обозревать всю диаграмму Минковского. Напротив, он может знать лишь о событиях, лежащих внутри его светового конуса, ограниченного прямыми *PM* и *PN* (прошлое). Поэтому ему неизвестны ни его абсолютное будущее, ни абсолютно безразличная область.

Действительное положение вещей, воспринимаемое наблюдателем в некоторый момент  $P$ , поистине удивительно отличается от того, что изображено на диаграмме Минковского. Дело не ограничивается тем, что наблюдатель знает лишь о событиях на части диаграммы, представляющей его абсолютное прошлое. Более того,



Фиг. 21.

он не наблюдает и своего прошлого в том виде, как оно изображено на этой диаграмме. Ведь в каждый данный момент мы воспринимаем лишь то, что действительно присутствует в этот момент. То, что в данный момент мы рассматриваем как прошлое, в этот момент на самом деле уже не существует. Все, что осталось от прошлого, — это только его след, существующий в настоящем. Этот след может быть в нашей памяти, или на фотопластинке, или он может сохраниться в структуре вещей (например, годовые кольца у деревьев, скелеты доисторических животных, слои минералов и отложений, изучаемые геологами и т. п.). Из этих следов мы и *восстанавливаем* прошлое в нашем воображении, а также



в рисунках и моделях. Ясно, что реконструкция динозавра — это не настоящий динозавр, так же как фотография прошедшего события не есть само событие. Так как наши воспоминания бывают полны жизни, движения, красок и чувства, то мы часто поддаемся их гипнозу и относимся к ним, как если бы они еще существовали. На самом деле все, что хранит наша память, — также лишь след минувшего прошлого. Этот след хранят клетки нашего мозга и, так сказать, «проигрывают» прошлое в настоящем, подобно тому, как можно проиграть граммофонную пластинку или просмотреть кинофильм.

Мы можем предсказать вероятное будущее, основываясь на наших познаниях: не только на самих событиях и фактах прошлого, но и на общих закономерностях, тенденциях и законах, выведенных путем абстрагирования (и сознательно, и интуитивно) из всего нашего индивидуального и коллективного опыта. Но в то время, когда мы предсказываем будущее, это будущее все же не существует. Оно на самом деле не что иное, как образ, ожидание, представление. Если наши предсказания хорошо обоснованы, то действительное будущее, когда оно наступит, может мало отличаться от предсказанного нами. Но, вообще говоря, наши предсказания очень часто ошибочны либо потому, что не соответствуют действительности наши познания о законах и закономерностях природы, либо ввиду недостаточности и неточности наших знаний об исходных фактах. Кроме того, весь наш опыт говорит о том, что все подобные предсказания подвержены вторжению случайных факторов, т. е. таких, которые происходят из областей, не поддававшихся в данный момент учету в наших исследованиях, факторов, которые нам поэтому неизвестны, но которые могут, однако, сыграть решающую роль при выяснении того, что должно произойти в действительности.

Теория относительности дает хороший пример важности случайных факторов. Как мы видели раньше, наблюдатель может иметь в данный момент  $P$  информацию лишь о том, что было в его абсолютном прошлом. Даже если он сможет установить связь с другими на-

блюдателями, он узнает лишь, что они наблюдали в их абсолютном прошлом в то время, которое для него также является абсолютно прошлым. Поэтому исходит ли познание из опыта одного наблюдателя или является коллективным познанием группы людей или общества, оно все равно должно основываться лишь на том, что прошло и исчезло к тому моменту, в который оно рассматривается. Однако громадное множество фактов, имеющих в природе, настолько систематично и упорядочено, что они с течением времени заметно не изменяются. Для таких фактов наши познания, основывающиеся на прошлом, будут хорошим приближением к действительности. Тем не менее, как это было показано в предыдущих главах, мы никогда *априори* не можем знать, где лежат границы применимости законов, которые выполнялись в наших прошлых исследованиях, и всегда должны быть готовы к тому, что при новых экспериментах в новых областях прежние закономерности перестанут выполняться.

Даже если бы мы смело могли положиться на наши познания об общих законах природы как на абстракции нашего прежнего опыта, наблюдений и эксперимента, все же ясно, что мы не сможем избежать случайностей по той простой причине, что не можем в точности и полностью знать происходящее относительно нас в абсолютно безразличной области. Если, например, наблюдатель  $P$  (см. фиг. 21) увидел частицу, движение которой описывается мировой линией  $OV$  в его абсолютном прошлом, то он имеет основание предполагать, что эта частица будет продолжать существовать и на отрезке  $VW$ , являющемся продолжением  $OV$  в область вне светового конуса с вершиной в точке  $P$ . Если бы он располагал богатой информацией о том, что происходило внутри его светового конуса в прошлом, то смог бы составить довольно полное представление о том, что имеет место вне этого светового конуса. Однако предсказанная им картина неизбежно подвержена случайностям, так как в абсолютно безразличной относительно наблюдателя  $P$  области всегда может происходить что-нибудь ему неизвестное (например, в лабораторию может неожиданно попасть метеорит из космоса, нарушить

работу приборов и отклонить движение частицы от предсказанного — продолжения мировой линии  $VW$ ). Вместе с тем очевидно, что происходящее в абсолютном будущем относительно наблюдателя  $P$  зависит от существующего в области, абсолютно безразличной относительно него, так что и его будущее также подвержено действию случайных факторов.

На первый взгляд все решает вопрос о том, не сможет ли *полное и определенное* знание абсолютного прошлого  $P$  сделать возможным столь же полное и определенное предсказание о происходящем в области, абсолютно безразличной относительно него, позволив таким образом в принципе устранить влияние случайных факторов. Этот вопрос, однако, имеет мало смысла, так как подобное полное и определенное знание прошлого, очевидно, невозможно. Конечно, такое знание требовало бы неограниченного углубления в прошлое и проведения наблюдений и измерений с соответственно повышенными степенями точности и чувствительности, так как во многих случаях то, что произойдет в нашем будущем, может критически зависеть от «мелочей», случившихся давным-давно. Но следы этого далекого прошлого неизбежно стираются и ускользают от наблюдений. Чем дальше мы углубляемся в прошлое, тем к более чувствительным и точным методам измерения должны прибегать и тем лучше должны понимать и знать законы природы, чтобы иметь возможность истолковать следы, наблюдаемые в настоящем, и по ним правильно восстановить прошлое. Ясно, что невозможно иметь столь чувствительные и точные приборы, а равно и достичь столь полного знания и понимания всей совокупности законов природы, чтобы иметь возможность получить *исчерпывающую и достоверную* информацию о нашем собственном абсолютном прошлом, хотя бы в какой-то данный момент нашего существования. Это означает, что заключения об абсолютно безразличной относительно нас области на основании знаний о нашем абсолютном прошлом по необходимости неполны. В абсолютно безразличной относительно нас области всегда имеется поэтому много неизвестного для нас. Хотя бы уже по одной этой причине предсказания о будущем

должны быть ограничены действием случайных факторов, вызываемых неизвестными нам событиями, происходящими в тот момент, когда делается предсказание. Конечно, мы можем узнать о них позднее (когда они уже станут частью нашего абсолютного прошлого), но тогда уже будет существовать новая абсолютно безразличная область, которая не будет нам известна в рассматриваемый момент. Итак, мы всегда будем сталкиваться с недостатком информации.

Можно показать, что все эти рассуждения неразрывно связаны с тем существенным фактом, что *наблюдатель является частью Вселенной*. Он не стоит вне пространства и времени, а подчинен законам физики: в каждый момент времени он занимает определенное место в общем процессе развития Вселенной и должен рассматриваться по отношению к этому процессу, причем его связь с этим последним подчинена тем же законам физики, которые он пытается изучить. В результате, из-за того, что законы физики утверждают, что какое физическое воздействие не может передаваться быстрее света, на информацию, известную наблюдателю, в каждый данный момент налагаются определенные ограничения.

Еще более поразительны те следствия, которые вытекают из квантовой теории в связи с тем фактом, что наблюдатель — это часть Вселенной. Дело в том, что если учесть неделимые кванты, связывающие наблюдателя с предметом его наблюдения, то окажется, что в каждом акте наблюдения принимает неустрашимое участие и сам наблюдатель объекта, причем это участие приводит к *возмущению* наблюдаемой системы. В результате, как показал Гейзенберг, обсуждая принцип неопределенности, каждый вид измерения содержит в себе некоторый минимум неопределенности. Может быть, не так широко известно, что уже сама теория относительности содержит с неизбежностью в своих предсказаниях некоторую собственную неопределенность, хотя и другой природы, чем в квантовой механике, но все же близкую к ней по своим следствиям.

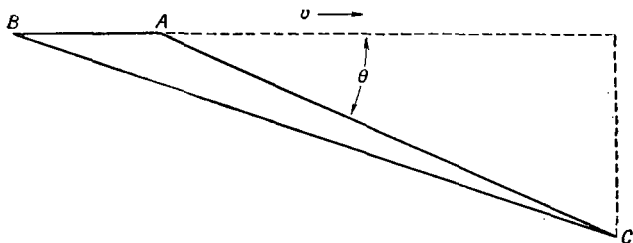
Вернемся, однако, к тому факту, что прошлое (по отношению к данному моменту, например к  $P$ ) на самом

деле уже не существует, как могло бы показаться из диаграммы Минковского, а является в действительности лишь *реконструкцией* (на основании которой мы, конечно, можем предсказывать вероятное будущее). Пример этого был приведен в предыдущей главе, когда наблюдатель в лаборатории следил за своим братом-близнецом, летевшим на космическом корабле, и наоборот. Каждый из них *реально наблюдает* сначала замедление процессов, происходящих у другого, когда космический корабль удаляется от лаборатории, а затем ускорение этих процессов, когда корабль возвращается назад, и больше ничего. В каждый данный момент наблюдатель помнит (или имеет записи) о том, что он видел до этого. Однако он не принимает свои воспоминания или записи за описание того, что происходило в действительности. Более того, он должен их истолковать или «внести в них поправку» на влияние времени, потребовавшееся свету, чтобы достичь его. Эта поправка предполагает *знание общих законов* физики, хотя бы в той мере, в какой они относятся к процессам распространения световых и иных сигналов. Ясно, что такая процедура приводит к *реконструкции* того, что, как он считает, произошло с другим наблюдателем на самом деле. Правильность такой реконструкции зависит от правильности его познаний законов распространения сигналов. Так, наблюдатель мог бы знать лишь законы нерелятивистской физики, и в этом случае в его реконструкции содержались бы характерные ошибки (существенные при больших скоростях), избежать которых было бы можно, воспользовавшись законами теории относительности.

Подобной же реконструкцией мы вынуждены пользоваться для определения длин предметов. Рассмотрим, например, линейку, движущуюся относительно лаборатории со скоростью  $v$ , концы которой изображены на фиг. 21 мировыми линиями  $RR'$  и  $SS'$ . Чему равна ее длина в момент, соответствующий точке  $O$  на мировой линии наблюдателя в лаборатории? Ясно, что этот наблюдатель не мог связаться с событиями  $R$  и  $S$  в момент, соответствующий событию  $O$ . Он мог узнать о них (например, с помощью световых сигналов) *лишь позже*. На основании этих данных он мог мысленно реконст-

руировать положение линейки, которое она занимала в момент, соответствующий событию  $O$ .

По определению, длиной линейки называется, конечно, расстояние между ее концами, *взятыми в один и тот же момент времени*, что и вычисляет наш наблюдатель, учитывая то время, которое требуется свету на путь до него от разных концов линейки. Чтобы получить необходимые для такого вычисления данные,



Фиг. 22.

он мог, например, произвести многократное фотографирование линейки, а зная расстояние от линейки до фотоаппарата и ориентацию последнего, он мог по общеизвестным геометрическим правилам вычислить длину этой линейки. Рассматривая эти его действия, можно отчетливо понять, что некоторые релятивистские свойства, например лоренцево сокращение движущихся объектов, в большой степени являются результатом принятых нами определений изучаемых свойств. Так, если линейка двигалась в направлении своей длины, а фотографирование велось с большого расстояния под углом  $\theta$  к направлению движения, то по самой фотографии еще *нельзя* будет судить о расстоянии между концами линейки в один и тот же момент времени (фиг. 22). Фотоаппарат просто выбирает и фиксирует все световые лучи, которым удалось пройти через его затвор в течение того (ничтожно малого) интервала времени, пока затвор был открыт. Предположив, что линейка видна из точки  $C$  (положение фотоаппарата) под весьма

малым углом  $\Delta\theta$ , и взяв соответствующее приближение, мы без труда вычислим, что световые лучи, зафиксированные фотоаппаратом  $S$  от концов  $B$  и  $A$  линейки, были испущены этими концами в моменты времени, различающиеся между собой на величину

$$\Delta t = (l - v \Delta t) \frac{\cos \theta}{c},$$

где  $l$  — длина нашей линейки. Отсюда

$$\Delta t = \frac{l}{c} \frac{\cos \theta}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}.$$

Поэтому ввиду движения линейки ее наблюдаемая на фотографии длина будет равна

$$l' = \frac{l}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}.$$

Значит, наблюдатель должен будет внести «поправку» на этот эффект, если ему нужно определить «длину» линейки при данном значении его временной координаты. Чтобы сделать такую поправку, он должен знать величину скорости движения линейки. Он может найти ее, сняв, например, серию фотографий в ряд последовательных моментов времени, которые он измеряет по своим часам, если он видит, что положение линейки изменяется.

Приведенными примерами мы проиллюстрировали степень абстрактности свойств (например, длины и частоты) в релятивистской области. Непосредственно сами по себе они если и наблюдаются, то редко. Более того, свойства удается оценить лишь после процесса реконструкции, основывающегося главным образом на знании прошлого — как общего, так и конкретного.

В основном наши знания имеют описанный выше характер. Ясно, например, что вся информация о доисторических временах целиком почерпнута из реконструкций тех следов, которые от них сохранились по сей день. Однако сведения и о временах исторических являются лишь реконструкцией, опирающейся вдобавок на сохранившиеся записи о делах и высказываниях людей (а эти записи оказываются часто неправильными, дезин-

формирующими, неполными и т. д.). И даже наши познания о собственном недавнем прошлом — это тоже аналогичная реконструкция, основанная на том, что нам удастся вспомнить. Таким образом, все прошлое — это своего рода реконструкция. Разумеется, она в большой мере реализуется на основании учета различных привычных нам закономерностей, полубессознательно. Но тем не менее нельзя отрицать, что прошлого уже нет и что от него остались лишь следы, которые мы интерпретируем, упорядочиваем и реконструируем, превращая в некоторое приближенное, вообще говоря, неполное представление о том, что случилось на самом деле. Это знание содержит лишь некоторую ограниченную и неполную часть истины, что делает его, однако, полезным общим руководством в будущих делах, если только быть готовым к признанию в нем ошибок по мере обнаружения.

Имея все это в виду, перейдем теперь к вопросу о том, каков истинный смысл диаграмм Минковского. Ответ гласит: диаграммы — это род «карт» мировых событий, правильно представляющих порядок, общую картину и структуру этих реальных событий, но это — вовсе не сам реальный мир. Ведь каждому известен тот факт, что карта мира делается из бумаги, красок и т. д. и что *карта* — это не сам мир. Тем не менее хорошая карта обладает *структурой*, в определенных отношениях подобной структуре мира. Например, если на такой карте между двумя городами *A* и *B* изображен некоторый город *C*, то при путешествии из *A* в *B* мы и в самом деле обнаружим, что проследуем через город *C*. (При этом, конечно, плохой картой нужно назвать такую, структура которой не имеет отношения к структуре того, что должно быть изображено на ней.)

Таким образом, можно сказать, что физика создала разновидность карт событий, происходящих в мире. Эти карты таковы, что если, например, событие *B* на карте лежит между событиями *A* и *C*, то мы обнаружим, что при реальных наблюдениях событие *B* происходит после события *A*, но раньше, чем *C*. В аналогичной карте для механики Ньютона пространство и время совсем не были бы связаны друг с другом, так что если бы хогь



один наблюдатель нашел, что данное событие  $A$  предшествует другому событию  $B$ , то отсюда следовало бы, что и для других наблюдателей реальная картина была бы такой же. Но из теории Эйнштейна физики получили другую «карту», более хитрую, в которой пространство и время тесно связаны друг с другом, а именно так, как это имеет место на диаграммах Минковского. Если на такой карте два события находятся по отношению друг к другу во взаимных абсолютно безразличных областях, то получается, что для наблюдателей, движущихся с разными скоростями, порядок этих событий во времени может быть разным — одни будут говорить, что событие  $A$  произошло раньше  $B$ , а другие — что  $B$  произошло раньше  $A$ . Но если каждое из событий лежит внутри светового конуса с вершиной в другом событии, то карта утверждает, что все наблюдатели одинаково определят, какое из событий произошло раньше, а какое — позже (так что порядок следования причинно-связанных между собой событий будет однозначно определен).

Очевидно, что даже когда речь идет об описании Земли — географии, карта является тщательной реконструкцией, основанной на громадном числе наблюдений, разработанной, упорядоченной и построенной в соответствии с определенными геометрическими принципами, являющимися абстракциями, которые были выведены из обширного прошлого опыта. Карта часто содержит ошибки, которые исправляются на основании позднейших наблюдений; временами коренным образом меняется и *структура* карты при распространении опыта на более широкие области (например, когда представление о том, что Земля плоская, сменилось представлением о шарообразности Земли). Более того, никто не считает, что карта *полная*; она — всего лишь общее руководство, и чтобы увидеть, какова в действительности данная страна, необходимо посетить эту страну.

Подобным же образом и представления физиков о пространстве и времени основываются на некоторой реконструкции, находящейся в согласии с соответствующими геометрическими, динамическими и структурными

принципами, выработанными как абстракции на основании обширного прошлого опыта. В этих представлениях также содержатся ошибки, которые подлежат исправлению на основании дальнейших наблюдений, и они также подвержены коренным структурным изменениям, когда наш опыт проникает в новые области. Эта карта, как и карта Земли, никогда не станет полной. Действительно, она создана лишь на основании того, что уже прошло и чего больше нет. Но если всему этому придана форма хорошей концептуальной карты, то она может послужить общим руководством для предсказания будущих событий. Тем не менее, чтобы увидеть, каким в действительности окажется будущее, мы, конечно, должны ждать, пока оно не наступит на самом деле. При этом временами бывают и неожиданности, совсем не соответствующие предназначениям нашей карты.

Если различие между картой и той областью, которая на ней изображена, настолько самоочевидно, то едва ли кто-нибудь перепутает их (как едва ли кто-нибудь перепутает картину, изображающую еду, с той реальной едой, которой он сможет насытиться). Однако наши представления о пространстве и времени (приобретенные в повседневном опыте и выведенные из физических исследований), оказываясь, не так уж трудно перепутать с тем, что имеет место на самом деле. Например, когда Ньютон выдвинул идею об абсолютных пространстве и времени, физики вовсе не думали, что это всего лишь разновидность концептуальной карты, структура которой может отчасти правильно соответствовать реально протекающим физическим процессам, а отчасти быть ложной. Напротив, они были уверены, что *реально существующее и есть* сами абсолютные пространство и время. Теперь же, когда оказалось, что это представление имеет ограниченную область применимости, вероятно, возникает стремление уверить себя, будто то, что *есть на самом деле*, — это то релятивистское пространство-время, которое изображено на диаграммах Минковского.

Можно избежать многих недоразумений такого рода, сказав сразу, что и ньютоновское и эйнштейновское

пространство-время — это концептуальные карты, и структура каждой из них в своей области подобна структуре реальных совокупностей тех событий и процессов, которые можно наблюдать на самом деле. При этом мы будем всегда готовы к тому, чтобы признать возможной необходимость все новых видов концептуальных карт, как только физика вступает в свою новую область.

Любая подобная карта является тем, чем не является мир. Иначе говоря, карта — это идея, картина, описание или представление, мир же ничему такому не тождествен. Но, как это свойственно мышлению, соответствующие действительности (адекватные) идеи дают структуру, похожую на то, что есть на самом деле. При этом проверить адекватность идеи можно, убедившись, что обнаруженная в реальном опыте структура подобна вытекающей из этой идеи. В противном случае потребуются новые представления, приводящие к новым структурам, которые должны быть адекватными обнаруженным среди реально наблюдаемых фактов.

При использовании любых карт (в том числе концептуальных) бывает необходимо на них сориентироваться, т. е. работающий с ними должен определить, какая точка карты изображает его собственное положение, а какая линия — то направление, куда он смотрит. Сделав это, он убеждается, что выбор любой точки локализации и любого направления наблюдения дает единый взгляд на мир. Однако с помощью хорошей карты, обладающей адекватной структурой, можно также сопоставить, как меняется перспектива, если глядеть из разных точек; и плодом соответствующего абстрагирования будет определение характеристик, остающихся инвариантными вне зависимости от выбора «угла зрения». Все это обогащает наши знания и понимание нами истинной природы изучаемой области. Поэтому, когда два наблюдателя, обладающих разными перспективами, обмениваются полученными ими данными наблюдений, они не должны вступать между собой в спор, выясняя, чья точка зрения «верна», а чья — «ошибочна». Вместо этого они должны сравнить свои карты и попытаться вместе понять, почему каждый из них, глядя на одну и ту же

область, имеет свою особую перспективу и ввиду этого вырабатывает свою собственную точку зрения, находящуюся в определенной связи с точкой зрения другого. (Конечно, если они не приходят к такому пониманию даже после серьезного анализа, может появиться опасение, что структура карт нуждается в переработке.)

В механике Ньютона роль местоположения и перспективы наблюдателя была крайне преуменьшена. Весьма вероятно, что физики всегда понимали неизбежность существования перспективы у реальных наблюдателей, но они думали, что такая перспектива не должна затрагивать фундаментальных законов физики. А именно, они считали, что физические процессы протекают в «абсолютных» пространстве и времени, не зависящих от того, каким образом мы их наблюдаем и измеряем, т. е. перспектива, угол зрения наблюдателя (или его приборов) не должны были, по их мнению, фигурировать в этих законах. Напротив, идея Эйнштейна состоит в том, что любая конкретная диаграмма Минковского — это карта, соответствующая тому, что будет наблюдаться в системе, движущейся с определенной скоростью и ориентированной определенным образом. Значит, в этой карте уже как-то отражена перспектива наблюдателя. Более того, как мы видели, каждый наблюдатель, движущийся с заданной скоростью, в каждый момент видит мир под другим углом зрения, так как он обладает лишь информацией о своем абсолютном прошлом, относящейся к разным областям пространства-времени в разные моменты существования этого наблюдателя. Итак, и то, что видят разные наблюдатели, и то, что видит в разные моменты времени один и тот же наблюдатель, — все эти результаты наблюдений необходимо постоянно сопоставлять друг с другом, относя их к пространственно-временной карте, структура которой правильна, и таким путем обогащать свои познания и понимание того, что на самом деле инвариантно и потому не зависит от конкретной перспективы каждого наблюдателя.

Поэтому ясно, что, хотя теория относительности подчеркивает особую роль каждого наблюдателя совсем иначе, чем это делали прежние теории, она тем не менее не впадает ни в какой «субъективизм», когда физика

---

сводилась бы лишь к тому, что сочтет более удобным этот наблюдатель или что он по своему желанию выберет. Напротив, ее лейтмотивом служит до сих пор почти полностью замалчивавшийся и забытый *факт*, что каждому наблюдателю неизбежно свойственна своя особая перспектива, делающая некоторым образом уникальной его точку зрения. Признание наличия такой особой перспективы позволяет расчистить почву для более реалистического выяснения того, что в действительности инвариантно и не зависит от перспективы наблюдателя.

## Физика и восприятие

### § 1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всего предыдущего изложения обсуждался вопрос о том, что в теории относительности Эйнштейна понятия пространства, времени, массы и пр. не рассматриваются уже как абсолютные, существующие сами по себе неизменные сущности или субстанции. Более того, всю физику можно представить себе как пауку, занимающуюся нахождением *относительных инвариантов* в тех постоянно меняющихся движениях, которые мы наблюдаем в мире, равно как и в тех изменениях точек зрения, систем отсчета, различных перспектив и т. п., которые используются нами при этих наблюдениях. Бесспорно, законы Ньютона и Галилея уже включали в себя целый ряд подобных релятивистских представлений (например, относительность в выборе начала координат, ориентации осей, скорости движения системы отсчета). Однако основные понятия — пространство, время, масса и пр., входившие в эти законы, рассматривались там как абсолютные. Вклад Эйнштейна заключался в распространении релятивистских представлений на все законы физики — не только на механику, но на электродинамику и оптику в специальной теории относительности и на гравитацию в общей теории относительности. Для этого Эйнштейну пришлось сделать уже обсуждавшийся нами революционный шаг — отказаться считать понятия пространства, времени, массы и пр. абсолютными и прийти к пониманию их как инвариантной взаимосвязи между наблюдаемыми объектами и событиями в каких-то системах отсчета. В разных системах отсчета пространственные координаты,

время, масса, энергия и пр., которые приписываются конкретным объектам и событиям, оказываются неодинаковыми. Но при этом существует ряд типов преобразований (например, повороты, пространственные сдвиги, преобразования Лоренца), позволяющих связать между собой многие характеристики, измеренные в разных системах отсчета. При этих преобразованиях некоторые величины (такие, как интервал и масса покоя) оказываются инвариантными, т. е. одними и теми же во всех системах отсчета, о которых идет речь. Конечно, такая инвариантность будет, вообще говоря, иметь место лишь в ограниченной области, а когда область исследований расширяется, то можно ожидать, что потребуются перейти к новым инвариантным соотношениям, по отношению к которым старые будут играть роль приближений или предельных случаев. Таким образом, закономерностям в природе соответствует возможность нахождения инвариантных связей. Поскольку каждый случай инвариантности имеет место лишь относительно своей области, можно ожидать, что наука будет открывать все новые и новые типы инвариантных соотношений, каждый из которых будет вносить вклад в понимание некоторой новой области явлений.

Сформулированная выше концепция может на первый взгляд показаться прямо противоположной выводам «здорового смысла» (как и всей старой ньютоновской физике вообще). Разве не вошло у нас в привычку считать, что мир состоит из более или менее неизменных объектов, подчиняющихся определенным неизменным законам? Другими словами, в нашей повседневной жизни никогда нет речи о каких-то «инвариантных соотношениях» — мы просто говорим о столах, стульях, деревьях, домах, людях и т. д. и всегда более или менее бессознательно понимаем под ними объекты или сущности определенного рода, образующие в своей совокупности привычный нам окружающий мир. Мы не считаем эти объекты или сущности *относительными инвариантами*, которые вместе со своими свойствами и законами, которым они подчиняются, получены как абстракции из полного потока изменений и движений. Поэтому кажется очевидным резкий контраст между тем, как мы

воспринимаем мир в повседневном опыте (а также в классической нерелятивистской физике), и тем, как его описывает теория относительности.

В этом приложении мы покажем, что различия между представлениями обыденного опыта и представлениями теории относительности происходят главным образом от определенных *взглядов* на этот опыт, вошедших в привычку. Мы обсудим также целый ряд новых, но довольно точно установленных научных данных, свидетельствующих о том, что в действительности характер нашего *восприятия* мира (то, как мы его видим, слышим, осязаем и т. д.) по своей сути и по общим закономерностям гораздо родственнее духу релятивистской физики, чем физики дорелятивистской. В свете этих фактов можно считать, что большая естественность для нас нерелятивистских понятий по сравнению с релятивистскими происходит главным образом благодаря ограниченному и неадекватному пониманию нами *области применимости обыденного опыта*, а не из-за какой-то изначальной неизбежности нашего привычного подхода к истолкованию этой области явлений.

## § 2. РАЗВИТИЕ НАШИХ ОБЫДЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В МЛАДЕНЧЕСТВЕ И ДЕТСТВЕ

В конце гл. I было сформулировано утверждение, в справедливости которого убеждают факты, полученные в самых разнообразных исследованиях. Мы начнем с замечательных работ Пиаже, посвященных проблеме развития интеллекта в младенчестве и детстве<sup>1)</sup>. Исходя из длительных и тщательных наблюдений, проведенных над детьми всех возрастов, начиная с самого рождения и до 10 лет и более, Пиаже смог пронаблюдать самый ход развития наших обыденных представлений о пространстве, времени, неизменных объектах,

---

<sup>1)</sup> J. Piaget, *The Origin of Intelligence in the Child*, London, 1953; J. Piaget, B. Inhelder, *The Child's Conception of Space*, London, 1956. (Пиаже — известный швейцарский психолог, профессор Женевского и Парижского университетов. Пиаже является создателем большой научной школы в области изучения умственного развития ребенка. — *Прим. ред.*)



неизменном веществе, полное количество которого подчиняется сохранению, и т. п. Тем самым он проследил процесс возникновения этих понятий и их развития до той ступени, когда они уже кажутся естественными и неизбежными<sup>1)</sup>.

Очень маленький ребенок ведет себя не так, как если бы он имел зрелое представление о мире, который существует отдельно от него и содержит в себе различные более или менее неизменные объекты. Напротив, Пиаже приводит убедительные факты, говорящие о том, что первые восприятия ребенка образуют одно неделимое целое. Иными словами, ребенок еще не умеет отличать происходящее внутри него самого от происходящего вне его, равно как и различать разные стороны как «внешнего», так и «внутреннего» мира. Вместо этого он воспринимает только один-единственный мир, в котором непрерывным потоком следуют раздражения, восприятия, ощущения и т. д., и в них ничто не выделяется как неизменное. Однако поворожденный наделен определенными врожденными рефлексам, связанными с питанием, движением и пр. При развитии этих рефлексов в окружающем мире выделяются разные стороны, к которым приспосабливается ребенок. Окружение начинает, таким образом, эффективно дифференцироваться в той мере, в какой в нем проявляются «узнаваемые» черты. На этом этапе узнавание имеет, однако, в значительной

---

<sup>1)</sup> Далее автор кратко излагает основные результаты исследований Пиаже, относящиеся к формированию у ребенка представлений о пространстве и времени, и именно эти результаты и некоторые примыкающие к ним результаты других исследователей, относящиеся к анализу непосредственного восприятия, с которыми он целиком согласен, он считает одной из причин исторического консерватизма в представлении классической физики о физическом пространстве и времени. Отдавая должное работам Пиаже и признавая определенную роль такого важного фактора, как психология ребенка, нельзя согласиться с автором, что этот фактор является основным и решающим. Следует подчеркнуть, что само формирование интеллекта человека (в детские годы и далее) происходит существенно в данном человеческом обществе, на данном этапе его исторического развития, т. е. при данной социальной структуре, уровне экономики и промышленности, классовых различиях, господствующей идеологии и т. д. Автор фактически оставляет в стороне эти важные обстоятельства. — *Прим. ред.*

мере функциональный характер (например, некоторые предметы существуют для «еды», другие — для «питья», третьи — для «хватания» и т. д.), и кажется при этом, что способность взрослого человека различать объекты по их размерам, форме, строению и другим воспринимаемым характеристикам еще не получает никакого развития или развивается слабо.

Эти рефлексy и функции вначале используются главным образом для удовлетворения естественных потребностей, о которых сигнализируют наши чувства, таких, как голод и т. п. На следующем этапе, однако, развивается так называемый «циклический рефлекс», что служит решающим шагом к развитию интеллекта. В этом рефлексе участвует спусковой импульс (приводящий, например, к движению руки), который сопровождается некоторым привходящим чувственным импульсом (например, зрительным — глаз, слуховым — ухо и т. п.), уже не служащим главным образом удовлетворению прямых потребностей ребенка. Это и можно назвать началом истинного восприятия, ибо простейший способ вступить в контакт с чем-либо, не служащим непосредственному удовлетворению телесных потребностей, — это включить его в такой процесс, когда определенный импульс к действию сопровождается некоторым ощущением.

Этот принцип циклического рефлекса входит в весь дальнейший процесс развития. Так, на определенном этапе младенец обнаруживает, что эти рефлексy приносят ему удовольствие. Пиаже пишет, что «он начинает сам развлекать себя зрелищами». Например, ребенок замечает, что, потянув за какую-то веревочку, он получает интересное для него ощущение движения чего-то, находящегося перед ним (если, например, веревочка привязана к раскрашенной игрушке). Не следует думать, будто он понимает причинную связь между веревочкой и этим движением или хотя бы предвкушает в воображении ощущение движения и поэтому пытается произвести его с помощью каких-нибудь операций. Нет, он *делает открытие*, что, предприняв такую операцию, он получит приятное ощущение, поддающееся *узнаванию*. Другими словами, он прежде всего обнаруживает,

что повторилось уже знакомое событие, но способность просто вызвать это событие в памяти приходит лишь много позднее. Итак, на этом этапе он только знает, что определенная операция приводит к некоторому узнаваемому явлению, которое ему приятно.

Способность узнать что-то, признать, что оно подобно тому, что испытывалось ранее, конечно, является необходимой предпосылкой для того, чтобы начать различать нечто относительно неизменное в потоке явлений, — вероятно, главным первоначальным элементом младенческого опыта. Другой важной предпосылкой этого является координация самых разных видов рефлексов, которые связаны с данным объектом. Так, первоначально у младенца, видимо, почти или вовсе нет представления о том, что объект, который он видит, — это тот же самый объект, который он слышит. Скорее всего, это — отдельные, совсем разные рефлексы: одни, связанные со слуховыми ощущениями, другие — со зрительными и т. п. Однако позднее эти рефлексы начинают координироваться друг с другом, так что ребенок, наконец, приходит к пониманию того, что он видит тот же объект, который он слышит, или трогает то, что видит, и т. д. Это важный шаг в развитии интеллекта, так как в нем заложены основы развивающегося в дальнейшем представления о едином объекте, отвечающем целому комплексу разных ощущений.

Однако ребенок все еще далек от представления о неизменном объекте или о неизменных причинных связях между такими объектами. Вместо этого его поведение на данном этапе показывает, что, столкнувшись с чем-либо знакомым, он теперь абстрагирует определенные грубо различимые совокупности ощущений и реакций, включающие координацию рук, глаз, ушей и т. п. Здесь содержатся в зародыше и представления об инварианте, так как в едином потоке опыта ребенок уже может узнать определенные инвариантные сочетания свойств картин. *Эти сочетания сами по себе воспринимаются лишь в целом*, так что сам объект вне его привычного окружения не узнается.

Позднее младенец начинает следить глазами за подвижным объектом и оказывается уже способен заметить

неизменность (инвариантность) его формы и пр., несмотря на движение. Следовательно, в нем начинается установление рефлексов, необходимых для осознания непрерывности существования определенных объектов независимо от привычного для них окружения. При этом ребенок не имеет еще представления о чем-то неизменно существующем и ведет себя так, как если бы он считал, что объекты начинают существовать, когда он их увидит, и перестают существовать, потерявшись из вида. При этом, если объект проходит мимо такого младенца, а затем исчезает из его поля зрения, он ищет этот объект взглядом не там, где находился этот объект в *последний* момент, а чаще всего там, где этот объект *впервые* появился, как если бы он искал естественную причину, породившую этот объект. Поэтому, когда объект уходит за преграду, у младенца не возникает и мысли о том, чтобы искать его там. Ребенок лишь позднее приходит к пониманию того, что это можно сделать лишь после того, как он начинает работать с «группами операций», по выражению Пиаже. Простейшей группой такого рода является «группа из двух». Она включает такие операции, как поворот чего-то туда, а затем обратно, как операции, когда объект прячут за преградой, а затем снова вынимают, когда объект раскачивают и т. д. Общим для всех этих случаев является то, что вторая операция противоположна первой — последовательность двух операций приводит снова к исходному положению вещей. И лишь поняв такую возможность, ребенок начинает разыскивать объект за тем препятствием, которое скрыло его из вида. Но при этом он ведет себя так, как будто у него еще нет представления о постоянно существующем объекте, существующем и тогда, когда его не видно. Скорее всего, ребенок чувствует, что он может «вернуть к существованию» исчезнувший объект, если применит некоторую «операцию», т. е. протянет руку за препятствие и достанет его оттуда.

В связи со сказанным следует напомнить, что младенец все еще не ощущает ясной и постоянной границы между собой и окружающим его миром, а также между разными объектами в этом мире. При этом он развивает рефлексы и операции, необходимые для осознания

такой границы в дальнейшем. Так, у него начинают развиваться представления о причинности и о разнице между причиной и следствием. Сначала дело обстоит так, как если бы ребенок считал причинность разнovidностью «симпатической» магии. Например, он мог обнаружить, что, подергав веревочку или какой-то иной близкий к себе объект, можно произвести определенное движение где-либо в другом месте. Ему не приходит в голову сразу же мысль о необходимости такой связи, но он часто поступает так, как если бы ожидал определенного результата, непосредственно следующего в виде «магической» ответной реакции на свое действие. В этом нет никакой неожиданности, ведь ребенок еще не отдает себе ясного отчета, что для него внутреннее, а что — внешнее. К тому же часто движение приводит к ощутимым *внутренним* последствиям без видимой промежуточной связи. Поэтому, пока для ребенка все стороны его опыта образуют неделимое целое без ясного разграничения на «внутри» и «вне», в его опыте не может быть ничего, что опровергало бы ожидание такой ответной «магической» причинности. Конечно, позднее он начинает замечать необходимость промежуточных связей для причинных взаимоотношений, а еще позже он начинает различать других людей, животных и даже просто объекты как причины событий, происходящих в сфере его опыта.

Тем временем у него складываются представления о пространстве и времени. Так, когда ребенок передвигает объекты или перемещает свое собственное тело, он приучается координировать свои изменяющиеся зрительные восприятия с ощущениями осязательными и с движениями своего тела. На этом этапе его понятие о группах движений выходит за рамки «группы из двух», постепенно усложняясь. Например, он узнает, что из одного места *A* в другое *B* можно попасть по множеству разных путей и все эти разные пути приведут его в одно и то же место (или, в другом варианте, если он уходит из *A* в *B* по одному из путей, он может также и вернуться в *A*, причем у него будет возможность выбора из множества путей). Все это может показаться нам само собой разумеющимся, но для ребенка, существую-

щего в водовороте процессов, это, вероятно, гигантское *открытие* — найти, что во всем калейдоскопе движения существуют определенные вещи, которые он может всегда *вернуть* себе, и притом множеством разных способов. Тогда понятие *обратимой* группы движений или операций даст ему основу для того, чтобы воздвигнуть на ней группу *неизменных положений*, к которым можно вернуться, и группу *неизменных объектов*, которые всегда можно свести к чему-либо знакомому или привычному, используя соответствующие операции (например, сдвиги, повороты и т. д.).

Между тем ребенок постепенно учится вызывать в своей памяти образы прошлого приблизительно в том самом порядке, как они реально происходили, а не просто *узнавать* что-то, как уже знакомое, лишь увидев его вновь. Отсюда начинается истинная *память*, а вместе с ней и предпосылка для различения прошлого и настоящего времени (а позднее в будущего времени, когда ребенок начнет конструировать мысленные образы ожидаемых событий).

Решающий перелом наступает, когда ребенок оказывается способным вообразить отсутствующий объект как реально существующий, даже когда он его на самом деле не воспринимает. Непосредственно перед этим этапом проблема состоит для него, по-видимому, в том, что отсутствующий предмет рассматривается как нечто такое, что он (или другие люди) может *произвести* или *сотворить* с помощью определенных операций. Теперь же он приступил к построению мысленного образа мира, в котором содержатся как воспринимаемые теперь, так и не воспринимаемые вещи, и каждой отведено ее место. Сами объекты и их места понимаются теперь как постоянно существующие и находящиеся между собой во взаимосвязях, в точности соответствующих группам движений и операций, уже известных ребенку. Такова, например, картина пространства, в котором каждая точка соединена с любой другой точкой множеством путей. Эта картина в точности воспроизводит инвариантные стороны его опыта для групп операций, которые давали ему возможность переходить из одной точки в другую по разнообразным путям.

По-видимому, на этом этапе ребенок начинает ясно представлять различие между самим собой и остальным миром. До сих пор он не мог провести этой грани, так как у него был лишь один круг восприятия, который и в самом деле охватывал все его ощущения в целом. Приобретая же способность строить мысленную картину мира, т. е. *вообразать* этот мир, ребенок представляет себе неизменную систему положений, которые заняты различными неизменными объектами. Но один из этих объектов — *он сам*. В своей новой мысленной «карте» мира он способен установить неизменное разделение между собой и другими объектами. В этой карте все распадается на две категории — на то, что «внутри его кожи», и то, что снаружи ее. Ребенок научается ассоциировать различные ощущения, удовольствия, боль, желания и пр. с тем, что «внутри его кожи», и таким образом он формирует представление о своем «я», отличном от остального мира, но вместе с тем занимающем в этом мире свое место. Подобным же образом он приписывает другим «я» тому, что находится внутри кожи других людей, а также животных. Он сознает, что каждое «я», с одной стороны, производит причинные воздействия на окружающий мир, с другой же стороны, оно само подвержено воздействию причин, действующих извне. Постепенно ребенок привыкает приписывать неодушевленным объектам более механические и низшего порядка «я», лишённые ощущений, целей и желаний, но все же способные производить определенные причинные воздействия и подвергаться влиянию причин внешнего по отношению к ним происхождения. Таким образом формируется общая картина мира в пространстве (и во времени), составленная из отдельных и неизменно существующих сущностей, способных причинно действовать друг на друга.

Как мы видели, при этом параллельно на одном и том же этапе формируются представления об объективно существующем мире и о субъекте, соответствующем одному из объектов, входящих в этот мир. Необходимость этого очевидна, так как мысленное изображение мира, служащее разновидностью концентуальной «карты», требует выделения одного из объектов на этой

«карте» для того, чтобы представить расположение самого наблюдателя так, чтобы стал возможен учет его собственной перспективы — угла зрения, под которым он видит мир в каждый момент. Это, так сказать, и есть релятивистская «карта», вроде диаграммы Минковского (см. обсуждение в конце гл. 29), и она должна содержать в своем составе нечто, представляющее положение, момент времени, ориентацию, скорость и т. д. самого наблюдателя. Поэтому мысленная карта, создаваемая каждой личностью, должна соответствующим образом отражать взаимоотношения этой личности с ее окружением.

Конечно, не нужно думать, будто ребенок сознает, что он формирует мысленное изображение или «карту» мира. Более того, как это было превосходно вскрыто Пиаже, маленькие дети часто затрудняются различать то, что они воображают или восстанавливают в своих мыслях и что они в действительности воспринимают своими органами чувств (они могут, например, воображать, будто другие люди способны видеть те объекты, о которых они думают). Итак, ребенок будет считать эту мысленную «карту» эквивалентной действительности. Привычка думать так подкрепляется каждым новым наблюдением, ибо как только «карта» была построена, она *вторгается во все непосредственные восприятия и накладывает на них свой отпечаток*, давая истолкование всему нашему опыту и становясь от него неотделимой. Мы хорошо знаем, конечно, что вид объекта, каким мы его воспринимаем, зависит от того, что мы знаем о нем. (Самым вынуклым примером может служить неопределенный рисунок, поддающийся двум истолкованиям, из которых одно очевидно в большей степени, чем другое. После того как рассматривающий его узнает о втором истолковании, ему часто бывает уже невозможно видеть этот рисунок в прежней форме.) Таким образом, в течение ряда лет мы приучаемся глядеть на мир через призму определенных представлений, немедленно откликаясь с их помощью на каждое новое наблюдение еще до того, как успеваем подумать. Это и приводит нас к уверенности, что определенные способы понимания и восприятия мира не могут иметь



альтернатив, хотя фактически эти способы были обнаружены и построены нами же, когда мы были еще детьми, и стали с тех пор для нас привычкой, но их плодотворность и правильность неразрывно связаны с определенной областью опыта.

Очень трудно оценить во всем объеме работу Пиаже на основании такого обзора. Кроме великого множества не упомянутых здесь проблем из периода младенчества, Пиаже обсуждал также развитие интеллекта у ребенка после того, как тот начинает говорить и размышлять более или менее так, как это имеет место у взрослых людей. При этом ребенок должен решить ряд новых проблем, ибо он должен перевести в структуру мысли и языка ту непосредственно воспринимаемую структуру мира, которая представлена на мысленной «карте», о которой уже говорилось. В ходе этого перевода его неизбежно подстерегают разные несоответствия, когда мысли и слова ребенка нередко противоречат тому, что он должен был бы ощущать. Тем не менее шаг за шагом ребенок научается определять, какие фигуры замкнуты, какие кривые плавны, какие вещи погружены в другие или находятся вне их, и т. д. Это — так называемые «топологические» взаимоотношения. Далее ему открывается явление перспективы (лежащее в основании проективной геометрии), и он узнает, как различать размеры и форму объектов. Так он входит в круг взаимосвязей, сущность которых выражается евклидовой геометрией. По ходу дела он сталкивается с необходимостью логического мышления, когда размышляет о структуре мира и испытывает потребность поделиться своими соображениями с другими людьми, равно как и в том случае, когда он хочет применить эти соображения к практическим задачам. (Пиаже отчетливо показал, что первоначально в мышлении детей логика играет ничтожную роль.) Так ребенок в процессе своего непрерывного развития формирует свои познания и понимание мира, используя для этого взаимосвязанные друг с другом системы мысленных образов, идей, словесных описаний и т. д., причем он конструирует структуру, подобную в ряде отношений той структуре мира, которую он непосредственно воспринимает.

С точки зрения проблем, затронутых в нашей книге, полезно кратко обсудить здесь развитие у ребенка представлений о постоянстве числа объектов и полного количества вещества, содержащегося в них, так как эти представления, очевидно, играют в физике фундаментальную роль. Как показал Пиаже, ребенок, лишь недавно начавший говорить, первоначально не имеет представления о том, что в системе содержится неизменное число объектов, не зависящее от того, как их двигают и переставляют местами. Вместо этого он каждый раз делает общую наглядную оценку того, кажется ли данная система объектов больше, меньше или равной другой системе, и не затруднится утверждать, что две первоначально одинаковые системы стали неравны друг другу после того, как их подвергли некоторым перестановкам в пространстве (даже если число объектов в них на самом деле осталось тем же).

Описанные выводы никого не удивят, если иметь в виду тот факт, что у ребенка еще нет представления о сохранении числа объектов при их движении и при изменениях их взаимных положений и их положений относительно наблюдателя. Дело в том, что понимание этого развивается лишь поэтапно. Сначала ребенок научается устанавливать взаимно однозначное *соответствие* между просто соотносящимися друг с другом объектами, например расставленными в параллельные ряды. Когда это соответствие ускользает от его внимания, например когда объекты после перестановки уже не образуют таких рядов, он уже не может думать о них как о сохранивших ту же численность. Позднее, когда он сумеет вновь установить между ними соответствие, у него формируется представление, близкое к представлению об «обратимой группе», т. е. что определенная совокупность (или множество) объектов с помощью соответствующей операции может быть вновь приведена в свое исходное состояние, где наблюдалось взаимно однозначное соответствие. На этой основе он формирует новое представление — новую мысленную «карту» объектов, в которой они во все времена обладают неизменным числом, что вполне отвечает содержанию его операций с совокупностью объектов, которые он может снова привести

в соответствие со стандартным порядком. Вообще говоря, впоследствии ребенок забывает об операциях установления соответствий и мыслит о числе объектов как неизменном свойстве, принадлежащем данной целостной совокупности, даже когда эта совокупность движется и объекты в ней меняются местами.

Представление о числе объектов как об изначальной и неизменной характеристике их совокупности становится столь привычным, что вопрос: сколько объектов в совокупности? становится уже слишком очевидным по своему смыслу и не требует больше особого обсуждения. Но когда к анализу этого вопроса приступили современные математики, то им фактически пришлось переоткрывать ту операционную основу, на которой каждый ребенок первоначально развивает свое представление о количестве (приходя к определению равенства кардинальных чисел в двух множествах путем установления взаимно однозначного соответствия между элементами этих множеств). Мы видим на этом примере, что люди часто наталкиваются на самые глубокие проблемы, изучая то, что кажется очевидным, так как «очевидность» сплошь и рядом — это то представление, которое суммирует инвариантные характеристики определенного круга опыта, ставшего уже привычным, причем его истоки уже лежат вне нашего сознания. Итак, чтобы понять очевидное, очень часто бывает необходимо перейти к более широкому взгляду на вещи, разобраться в основных операциях, движениях и изменениях, в рамках которых определенные характеристики оказываются инвариантными.

Представление о сохранении количества материи или вещества формируется подобным же образом. Так, если перелить данное количество жидкости во много сосудов различной формы, то маленький ребенок, не колеблясь, скажет, что общее количество жидкости увеличилось или уменьшилось, в соответствии с тем общим впечатлением, которое производит в его непосредственном восприятии это новое распределение жидкости. Позднее, когда он обнаруживает возможность вернуть жидкость снова в ее прежнееместилище, где она снова займет свой прежний объем, он приходит к мысли о постоян-

стве количества жидкости. Необходимость пройти ребенку этот путь для развития его представлений очевидна, ведь *априори* нет никаких оснований предполагать сохранение количества какого-то данного вещества. Такая мысль приходит лишь позднее и только в результате необходимости понять определенные стороны опыта. Однако позднее забывают, что эта мысль должна была сначала развиться. Далее становится привычным, а затем кажется уже неизбежным считать, что весь мир составлен из некоторых основных веществ, полные количества которых абсолютно неизменны. Когда мы затем не обнаруживаем такой абсолютной неизменности на уровне нашего обыденного опыта, мы постулируем ее наличие на атомном уровне или где-либо еще.

Как и в случае числа объектов, здесь также возникают весьма глубокие проблемы, когда мы пытаемся понять то, что нам кажется очевидным. Едва ли что-нибудь более очевидно, чем представление о неизменности количества вещества. Тем не менее, чтобы глубже разобраться в этом понятии, нам приходится подходить к нему шире, выходя за те рамки, в которых оно обязательно справедливо. Тогда можно увидеть, что это представление возникает, когда ребенок обнаруживает род *относительной инвариантности* при определенных операциях, как, например, при переливании жидкости обратно в ее исходное местоположение. Мы обнаруживаем, таким образом, что для понимания непосредственного восприятия необходимо предпринять в сущности то же, что и для понимания теории относительности. Именно следует отказаться от того представления, будто что-либо может быть абсолютно неизменным и постоянным, и изучить неизменность определенных соотношений или свойств при широком круге операций, включающих наблюдение, измерение и т. п., при которых изменяются условия, окружение и перспектива объекта и наблюдателя.

Подводя итог рассуждениям, связанным с работами Пиаже, мы напомним, что в раннем младенчестве у ребенка существует некоторый род единства чувств, ощущений, восприятия и пр., находящихся в постоянном изменении и может вообще отсутствовать поддающаяся

различесию структура с неизменными характеристиками. Развитие интеллекта основывается затем на ряде операций, движений и пр., с помощью которых ребенок *узнает* о свойствах окружающего мира. При этом приобретаемые им знания всегда исходят из возможности обнаруживать в этих операциях и движениях инвариантные взаимосвязи. Таковы, например, инвариантные соотношения между тем, что он видит и что он слышит и т. д., инвариантная взаимосвязь между причиной и следствием, инвариантность формы объекта, за движением которого следят его глаза, инвариантная возможность «повернуть вспять» определенные изменения с помощью соответствующих операций и т. д. и т. п. Столкновение с каждым видом инвариантности сопровождается развитием соответствующего мысленного изображения (а позднее отражается в структуре определенных взглядов и в языке), что и играет роль своего рода «карты», адекватно представляющей инвариантные взаимосвязи. Эта адекватность понимается в том смысле, что в ней отражены инвариантные свойства, подобные открытым в этих операциях. Таково, например, мысленное изображение пространства, в котором существуют неизменные положения, соединенные между собой бесконечным числом возможных путей, в соответствии с операционным опытом — возможностью прийти в одно и то же место по множеству разных путей. Вскоре после этого непосредственное восприятие начинает носить на себе отпечаток этих «карт», а затем уже теряются всякие воспоминания о том, что «карта» лишь *изображает* обнаруженную прежде инвариантность. Более того, эта «карта» настолько пронизывает своей структурой воспринимаемое, что ее представления уже кажутся неизбежной и необходимой чертой всего нашего опыта, настолько очевидной, что ее критический разбор становится весьма затруднительным.

Из работ Пиаже видно, что для понимания процесса восприятия необходимо отойти от привычной точки зрения, когда мы более или менее смешивали общую структурную картину наших мысленных «карт» с картиной самого мира и не могли представить себе последнюю никак иначе при всех осмысленных условиях. Вместо

этого требуется проанализировать обширное целое нашего процесса восприятия как своего рода поток, из которого выделяются *относительно инвариантные* «конструкции», которые и отображаются на этих «картах», т. е. последние подробно копируют вид этих «конструкций». Но в этой книге было показано, что в физике переход от нерелятивистской точки зрения к релятивистской представляет собой подобный же шаг. Дело в том, что при этом мы перестаем рассматривать наши понятия пространства, времени, массы и пр. как абсолютно неизменные и необходимые характеристики мира — напротив, мы считаем теперь, что они выражают инвариантные взаимоотношения, реально существующие в определенных областях физического опыта.

### § 3. РОЛЬ ИНВАРИАНТОВ В ВОСПРИЯТИИ

Из обсуждавшихся в предыдущем параграфе исследований Инаже видно, что развитие интеллекта, судя по всему, базируется на возможности находить инвариантные характеристики в любой данной области операций, изменений, движений и т. п., а также осваивать соответствующие соотношения с помощью адекватных мысленных изображений, взглядов, словесных выражений, математических символов и т. д., отображающих ту структуру, которая обнаружена в реальности. Мы укажем теперь на некоторые факты, полученные при непосредственном изучении процесса восприятия, которые определенно подтверждают изложенные концепции и значительно расширяют область их действия.

Обычно восприятие представляют себе как процесс *пассивный*, в котором просто фиксируют чувственные впечатления, с тем чтобы объединить их в стройную систему, закрепить в памяти и т. д. Но в действительности новейшие исследования показывают, что восприятие, напротив, является *активным* процессом, в ходе которого человек вынужден производить множество действий для того, чтобы придать воспринимаемому им определенную *общую структуру*. Разумеется, эта структура объективно верна в том смысле, что она подобна структуре вещей и процессов, обнаруживаемых

в обыденном опыте. Но все же тот факт, что значительная часть наблюдаемого нами упорядочена и организована таким образом, как этого требует функционирование нашего собственного организма и особенно нервной системы, имеет весьма серьезные последствия для изучения новых областей опыта — и в области собственно непосредственного восприятия, и в науке (последняя обычно основывается на восприятии с помощью приборов, позволяющих вступить в эти новые области).

Активную роль наблюдателя можно яснее всего почувствовать, начав анализ с осязательного восприятия. Так, если попробовать определить форму невидимого предмета просто на ощупь, необходимо *брать* этот предмет, поворачивать его, прикасаться к нему с разных сторон и т. д. (Этот вопрос был подробно исследован Гибсоном с сотрудниками<sup>1)</sup>.)

При таких операциях редко оглают себе отчет в *индивидуальных ощущениях*, возникающих в пальцах, суставах и т. д., а просто непосредственно воспринимают общую структуру объекта, складывающуюся некоторым образом из очень сложных смесей всех ощущений. Восприятие такой структуры зависит от двух направлений тока нервных импульсов — не только от тока ощущений, направленного внутрь («центростремительного»), о котором мы уже упоминали, но также и от тока из центра («центробежного»), определяющего движения нашей руки. Дело в том, что познание этой структуры складывается из *взаимосвязей* между «центростремительными» и «центробежными» токами (т. е. мы сопоставляем ответы на определенные движения — повороты, надавливания и пр.).

Поэтому очевидно, что осязательное восприятие есть с самого начала сочетание активных операций, предпринимаемых перцепиентом. Тем не менее «центробежные» импульсы, приводящие к движениям руки и управляющие притоком ощущений, либо вообще не осознаются, либо остаются на грани нашего сознания. Напротив, над ними полностью господствует ощущение структуры самого объекта. Представляется ясным, что из удивитель-

<sup>1)</sup> J. G. Gibson, *Psychological Review*, 69, 477 (1962).

но разнообразного и изменчивого потока движений и связанных с ними ответных ощущений мозг способен абстрагировать *относительно инвариантную* структуру ощущаемого объекта. Эта инвариантная структура с очевидностью не сводится к отдельным операциям и ощущениям и может быть абстрагирована лишь из полной совокупности таковых за некоторый период времени.

На первый взгляд можно было бы подумать, что положение со зрением является в корне другим и что картина мира «воспринимается» совершенно пассивно. Однако более подробные исследования показывают, что и в зрительном восприятии перцепиент играет подобную же активную роль, а структура того, что мы видим, абстрагируется из аналогичных инвариантных взаимосвязей между определенными движениями и тем изменением зрительных ощущений, которым глаз отвечает на эти движения.

Одним из самых простых движений, которых требует зрение, является движение, изученное Дичбэрном<sup>1)</sup>, который открыл, что глазное яблоко постоянно совершает малые и быстрые колебания, при которых изображение на сетчатке глаза смещается примерно на расстояние, равное расстоянию между соседними клетками сетчатки. Кроме этого, существует и более медленный постоянный сдвиг, завершающийся «скачком», при котором изображение более или менее точно возвращается на прежнее место. Были проведены опыты, в которых все поле зрения испытуемого представляло собой отражение в зеркалах, установленных таким образом, чтобы их движения полностью компенсировали результаты движений глазного яблока. Оказалось, что при этом зрение сначала нарушается, а затем и полностью перестает действовать в том смысле, что испытуемый вообще перестает что-либо видеть, хотя на его сетчатке сфокусировано четкое изображение окружающего мира.

Дичбэрн объяснил это явление, сославшись на тот факт, что, когда к нервной клетке прилагается постоянный импульс в течение некоторого времени, эта клетка

---

<sup>1)</sup> R. W. Ditchburn, Research, 9, 466 (1951); Optica Acta, 1, 171; 2, 128 (1955).



к нему привыкает (явление *аккомодации*) и ее реакция на этот импульс уменьшается, падая в конце концов ниже порога восприятия. Когда же мы фиксируем на всей сетчатке расположение изображения, т. е. картину распределения интенсивности света (с помощью зеркал, движения которых компенсируют движения глазного яблока), то следует ожидать проявления такого процесса аккомодации. Так можно объяснить то нарушение и полное исчезновение всей картины в поле зрения испытуемого, которое наблюдалось в опытах Дичбэрна. В условиях же нормального зрения такая аккомодация будет лишь частичной благодаря наличию колебаний и других движений глазного яблока, которые всегда приводят к соответствующим изменениям световой картины на сетчатке. Реакция нервов, связанных с данной клеткой сетчатки, поэтому меньше зависит от интенсивности света в данном ее месте, чем от того, насколько быстро эта интенсивность *изменяется* от точки к точке. Это значит, что возбуждение зрительного нерва соответствует не световой картине на сетчатке, а скорее такой видоизмененной картине, в которой усилены контрасты и в которой особое впечатление производят границы объектов, где интенсивность света претерпевает резкое изменение. Так достигается выделение контуров и форм предметов, что способствует их раздельному и четкому восприятию — восприятию, которое не было бы даже приблизительно таким же ясным и разборчивым, если бы наш глаз был чувствителен лишь к интенсивности света, а не к ее изменениям.

Плэтт сделал интересное предположение<sup>1)</sup>, что наша способность выделять более прямые линии с высокой степенью точности зависит от упоминавшихся уже движений глазного яблока типа сдвига (дрейфа) и «скачка». Кроме того, Хьюбел и Визель показали, проследив связи оптического нерва от ганглионарных клеток сетчатки и до клеток мозга, что определенные области сетчатки, напоминающие ячейки частой прямой решетки

<sup>1)</sup> J. R. Platt, Principles of Self Organizing Systems, Zopf and von Fuerster (eds.), London, 1961; Information Theory in Biology, Yockey, Quastler and Platzman (eds.), London, 1958; Scientific American, 202, 121, June, 1960.

ки, отображаются на соответствующие клетки коры головного мозга<sup>1)</sup>). Факт такого отображения объясняет нашу способность давать примерную оценку того, в каких участках поля нашего зрения проходят данные видимые линии (точность этой оценки соответствует ширине ячеек, которая в несколько раз превышает расстояние между клетками сетчатки). С другой стороны, как выяснил Плетт, можно наблюдать нарушения строгой линейности, соответствующие на изображении на сетчатке примерно одной тридцатой расстояния между клетками. Плетт заинтересовался вопросом о том, как можно объяснить возможность столь замечательной точности.

Идея Плетта основывается на том, что, как было замечено, движения глазного яблока являются вращательными. При малых поворотах глазного яблока вокруг оси в плоскости, параллельной центральной ямке («желтому пятну» — небольшой области центрального зрения, используемой для точного определения формы, размеров и т. д. предметов), изображение, проектирующееся на эту область, приобретает соответствующее линейное движение. Вообще говоря, такое движение вызовет *некоторое* изменение картины возбуждения, которое, конечно, поддастся восприятию. Но в том случае, когда смещение изображения прямой линии происходит параллельно ей самой, изображение линии не изменится. Оно будет тогда *инвариантно* относительно этого движения. Плетт постулирует, что мозгу свойственна чувствительность к такого рода инвариантности, позволяющая ему обнаруживать, что линия — прямая<sup>2)</sup>).

Очевидно, что степень точности отождествления при таком процессе не обязательно ограничивается величиной расстояния между клетками сетчатки, так как если линия не является прямой, то происходит изменение в

1) D. H. Hubel, Scientific American, 209, 54, November, 1963.

2) То обстоятельство, что прямые линии не выпадают вообще из видимой нами картины вследствие явления аккомодации нервных клеток, может объясняться многими возможными механизмами. Например, можно предположить, что когда их наблюдаемая интенсивность начинает заметно угасать, глазное яблоко совершает «скачок» и данная линия попадает на новый участок желтого пятна.

картине первого возбуждения. Это изменение может быть обнаружено, даже если отклонение от идеальной прямой будет меньше размеров самой клетки сетчатки, если только *чувствительность* к малым изменениям интенсивности света, падающего на такие клетки, достаточно велика <sup>1)</sup>).

Вместе с тем для восприятия характерно, что обычно существует *много* разных механизмов для получения одного и того же типа информации, которые усиливают или дополняют друг друга. Так, отображение областей палочек сетчатки на клетки коры головного мозга, открытое Хьюбелом и Визелем, приводит к грубому восприятию прямых линий, что может дополняться механизмом, предложенным Плэттом, когда требуется более тонкий анализ. Кроме того, из обсуждавшихся выше в § 2 результатов Пнаже с большой вероятностью следует, что каждый человек с детства конструирует определенные способы *узнавания*, какие линии — прямые, сравнивая их с некоторой мысленной сеткой линий, выработанных в течение длительного опыта. Вдобавок к этому в работах Хелда, Гибсона и других выдвигаются и другие механизмы, к обсуждению которых мы переходим.

Тот важный момент, который мы хотели бы подчеркнуть в исследованиях, посвященных зрению, состоит в том, что без движений или изменений изображения на сетчатке глаза восприятия вообще не происходит, а также, что характер этих вариаций играет важную роль в определении реально видимой нами картины. Важно, что такие вариации являются не только результатами изменений, естественным образом происходящих вокруг нас, но (как и в случае осязательного восприятия) они могут вызываться активно с помощью движений органов чувств самого наблюдателя. Сами по себе эти изменения сколько-нибудь заметно не ощущаются, ощущается лишь нечто относительно инвариантное, например контуры и форма какого-либо предмета, тот факт, что

<sup>1)</sup> Повороты глазного яблока вокруг оси, перпендикулярной плоскости желтого пятна, могли бы позволить производить соответственно точное распознавание кривых постоянной кривизны (т. е. узнавать, что на малой области дуги кривизна не изменяется).

данная линия — прямая, размеры и форма вещей и т. д. и т. п. Однако сама инвариантность не могла бы восприниматься, если бы активно не изменялось изображение.

Из опытов, сделанных Хелдом с сотрудниками и Гибсоном<sup>1)</sup>, вытекает, что движения нашего тела также играют важную роль в зрительном восприятии, в частности при сопоставлении этих движений и вызываемых ими изменений в видимой оптической картине мира. Например, когда человек надевает очки, искажающие предметы (приводящие к искривлению прямых линий), и попадает в помещение, убранный еще не знакомым ему образом, он постепенно приучается «корректировать» искажения, вызванные очками, и *перестает замечать искривления, которые на самом деле должны иметь место в изображениях прямых линий на сетчатке его глаз*. Когда он после этого снимет такие очки, прямые линии кажутся ему (по крайней мере в первые моменты) искривленными. (Крайний вариант подобного опыта состоит в использовании очков, переворачивающих изображение. Через некоторое время человек приучается видеть в них все в правильном виде, но, сняв их, он видит все в течение короткого срока перевернутым.)

В этих опытах интересно то, что способность «перелучиться» узнавать прямые линии очень сильно зависит от возможности активно перемещать свое тело. Поэтому те люди, которые имеют возможность ходить по помещению, оказываются способными довольно быстро приспособить свое зрение к искажающим очкам, тогда как люди, сидящие на стульях и перемещаемые по тому же помещению, либо вообще не приспособляются, либо такое обучение протекает у них значительно менее эффективно. Таким образом, ясно, что существенны не просто соответствующие *изменения* изображения на сетчатке глаз, вызываемые движениями, но особенно такие изменения, которые *активно* производит сам перцепиент.

---

<sup>1)</sup> Обсуждение этих опытов см. в работах: R. Held, S. J. Freedman, Science, 142, 455 (1963); Psychology, A Study of Science. S. Koch (ed.), New York, 1959, p. 456; R. Held, J. R. Kossli, Science, 141, 722 (1963).

Иными словами, как и в случае осязательного восприятия, то, что мы видим на самом деле, некоторым образом определяется абстрагированием инвариантов из тех изменений, которые происходят в видимом нами, а эти изменения, хотя бы отчасти, сами являются важным продуктом процесса наблюдения.

При анализе рассмотренных здесь опытов можно было бы сделать правдоподобное допущение, что, приступая к накоплению жизненного опыта, связанного с движением, начиная с раннего детства (как это обсуждалось в работе Пиаже), каждый человек уже наделен некоторого рода евклидовыми правилами, заложенными в движения его тела. Поскольку он может это проверить, попытавшись пройти с закрытыми глазами из одного угла комнаты в другой, ему может показаться, что его нервная система располагает некоторой способностью или дарованием, позволяющим ему абстрагировать из всех происходящих движений и ощущений в его теле какую-то информацию насчет того, является ли прямым его путь, насколько он повернулся и т. п. При нормальном зрении (без искажающих очков), когда человек идет по такой механически ощущаемой прямой линии, в изображении на сетчатке его глаз происходит *проективное преобразование* (по крайней мере приближенно), при котором изменяется видимая форма предметов, но все прямые линии переходят снова в прямые. Поэтому, идя по прямой линии, мы обнаружим, что механически получаемая информация об инвариантности направления движения будет согласовываться с информацией, получаемой оптически, абстрагированной из проективного преобразования линий, находящихся в поле зрения. Если же надеть теперь искажающие очки, то окажется, что механическое ощущение движения по прямой будет сопровождаться зрительным ощущением движения по искривленной линии. Таким образом, возникнет противоречие между тем, что мы видим, и тем, что ощущаем в движении, в кинестетическом ощущении и пр. Тогда кажется, что на подсознательном уровне наш мозг и нервная система пытаются разрешить это противоречие, проверяя разные гипотезы относительно того, какой образ в действительности изображает прямую ли-

нию<sup>1)</sup>). Когда гипотеза, устраняющая противоречие между тем, что мы видим и что ощущаем механически, найдена, то она сама непосредственно входит в состав структуры нашего восприятия. Поэтому человек, надевший искажающие очки, постепенно перестает воспринимать зрительно искривленную линию, когда, согласно механическим ощущениям, эта линия — прямая, а начинает и *видеть*, и *чувствовать* одну и ту же прямую линию. (Мы сталкиваемся здесь с тем же положением, которое имело место в работе Пнаже, обсуждавшейся в предыдущем параграфе, когда ребенок знакомился с инвариантным соответствием между тем, что он видит, что он слышит, что он трогает и т. д.)

При обсуждении работ Дичбэрна, Хьюбела и Визеля, Плэтта мы уже заметили, что по зрительному нерву передается не просто «копия» изображения на сетчатке глаза: при этом имеет место тенденция выделить определенные черты структуры путем повышения контрастов и обнаруживается особая чувствительность к наличию или отсутствию в изображении линий и других подобных фигур. Вместе с тем из работ Хелда и Гибсона ясно видно, что воспринимаемая нами картина в действительности содержит такие структурные детали, которых *даже и нет в данный момент на сетчатке глаза*, но которые человек как бы видит на основе предшествующего опыта.

Воспринимаемая нами картина не является поэтому просто изображением или отражением наших мгновенных ощущений, она является скорее результатом сложного процесса, ведущего к непрерывно изменяющейся (трехмерной) *конструкции*, которая представляется нам как своего рода «внутреннее видение». Эта «конструкция» основана на абстрагировании того, что инвариантно во взаимоотношениях между системой движений, активно производимых самим перцепентом, и

---

<sup>1)</sup> Плэтт предположил, например, что мозг может обнаружить какие-то новые комбинации поворотов глазного яблока (вокруг осей, параллельных и перпендикулярных плоскости желтого пятна), которые могут быть согласованы им с механическим ощущением прямой линии.

результатирующими изменениями всей совокупности его чувственных «входных данных». Эта конструкция работает фактически как «гипотеза», не противоречащая наблюдаемым инвариантным характеристикам всего вместе взятого опыта этого человека по отношению к рассматриваемому окружению. (Например, восприятие прямой линии соответствует гипотезе о том, что инвариантно при оптических, механических и других изменениях, которые происходили при наблюдении этой линии в процессе движений, совершаемых воспринимавшим ее лицом.)

Возникновение такой «конструкции» зависит не только от описанного выше абстрагирования инвариантных соотношений между движением и чувственными восприятиями, оно зависит и от всего того, что *известно* перципиенту. Например, если человек рассматривает какую-то букву с расстояния, слишком большого, чтобы видеть ее отчетливо, он будет различать нечто весьма туманное и бесформенное. Но если ему *сказать*, что это за буква, ее изображение внезапно возникнет для него с относительно большой четкостью. Другой пример: пусть человек уронил маленькую монету на очень пестрый ковер, на котором ее, вообще говоря, нельзя разглядеть. Если же он заметит отраженный ею световой зайчик, в его восприятии внезапно возникнет та монета, об утере которой он *помнит*. Ее изображение должно было присутствовать на сетчатке его глаз все время, но тем не менее оно не включалось во «внутреннее видение» восприятия, пока световой зайчик не составил противоречия с восприятием ковра, на котором ничего нет, а это уже подсказало образ известной нашему перципиенту монеты.

Гибсоны<sup>1)</sup> описали множество опытов, в ходе которых еще детальнее были исследованы упомянутые выше свойства восприятия. Они показали, что в восприятии глубины или трехмерного характера мира бинокулярное зрение является лишь *одним* из действующих факторов. Другим важным фактором является как раз изменение внешнего вида предметов при нашем движении. Так,

---

<sup>1)</sup> J. G. Gibson, E. J. Gibson, Journ. Experimental Psychology, 54, 129 (1957).

когда мы идем, образ предметов, к которым мы приближаемся, становится крупнее. Чем объект ближе к нам, тем быстрее изменяется его видимая величина. Всем этим (как и многим другим, например расположением теней, степенью затянутости дымкой удаленных объектов и т. п.) обуславливается способность мозга абстрагировать информацию, касающуюся расстояний до объектов в направлении луча зрения. На основе такой информации мозг непрерывно «конструирует» совокупность всего воспринимаемого в уже описанном духе, т. е. выдвигает различные «гипотезы» об инвариантности. Например, если вы ошиблись в оценке расстояния до предмета, то вы неизбежно ошиблись при этом в оценке и его размеров. Когда вы идете, то можете почувствовать, что видимые размеры предмета изменяются не так, как этого требует ваша оценка расстояния до него. Внезапно в поле вашего восприятия возникает новая картина объекта, согласующаяся с новой информацией о нем.

Таким образом, мы видим, что то, что реально появляется в поле нашего восприятия, по крайней мере пока мы рассматриваем нечто относительно статичное, — это структура, порядок и расположение вещей, которые предполагаются инвариантными в отношении своих размеров, формы и пространственных соотношений. Эта конструкция во «внутреннем видении» такова, что предположение об ее инвариантности объясняет не только наблюдаемую в данный момент картину, но и ее изменения, происходившие при предшествовавших движениях, равно как и все, что мы знаем или думаем, что знаем о ней. В каждый момент эта конструкция имеет характер предположения в том смысле, что она способна измениться, если вытекающие из нее выводы будут проговорены последующему опыту, заключающемуся в движениях, испытаниях, в проверках и т. п. Здесь мы отмечаем существенную роль *активных* движений перцепиента, так как именно с их помощью всегда проверяются, исправляются, видоизменяются и т. д. рабочие «гипотезы» «внутреннего видения» восприятия.

До сих пор мы рассматривали лишь случаи, когда перцепиент двигался в относительно статичном окружении.



Если же и в самом окружении также происходят движения, то возникает дополнительная проблема: необходимо определить, какие из наблюдаемых изменений вызваны движением наблюдателя, а какие — движениями объектов окружения. Для разрешения этой проблемы фактически необходима способность абстрагировать инварианты высшего порядка — *относительные инварианты состояния движения*.

Вообще говоря, когда человек перемещается, то его мозг начинает (главным образом, бессознательно) отмечать в окружении те характеристики, которые при этом движении существенно не изменяются. Они интерпретируются как удаленный и относительно фиксирующийся фон, на котором и может восприниматься остальное движение. Более близкие объекты, конечно, изменяют свои видимые размеры, форму и прочее вполне закономерно, когда человек идет, поворачивает голову и т. д. Представляется, что мозг выработал способность реагировать на такие видимые перемещения и изменения в ближайшем окружении человека, особенно когда они координируются с движениями, производимыми самим перципиентом. Это позволяет исключить из наблюдаемой картины те изменения, которые вызываются самим наблюдателем, так что конструкция «внутреннего видения» в общем соответствует статическому миру, в котором перципиент ощущает движущимся самого себя. Поэтому, когда человек ходит по комнате, ему не кажется, что движется эта комната, что она поворачивается, изменяется ее форма и т. п. Более того, он воспринимает комнату как неподвижную, а себя как движущегося, что и позволяет ему объяснять все наблюдаемые изменения. Если же, например, у него поврежден тонкий механизм равновесия в его внутреннем ухе, то он уже не способен координировать свои механические восприятия со зрительными. У него может начаться головокружение, и ему покажется, что весь мир движется вокруг него. Для каждого, кто когда-либо испытал такое ощущение, разница между обоими видами восприятия кажется очень большой.

Исключив движения перципиента, мозг переходит тем самым к абстрагированию следующего порядка,

когда он осмысливает движение некоторой части поля зрения на фоне, воспринимаемом как фиксированный. В наиболее простом случае некоторый данный объект движется в пространстве поступательно и, возможно, вращается при этом. Человек тогда способен воспринимать этот объект как имеющий на самом деле постоянные размеры и форму, несмотря на то, что изображение объекта на сетчатке все время изменяется. Такое восприятие неразрывно связано со способностью человека скорее ощущать, что подобный объект обладает *определенным состоянием движения*, чем воспринимать его как серию «натюрмортов», каждый из которых представляет объект в несколько ином положении. Все происходит так, как если бы мозг был в состоянии образовать сопутствующую систему отчета, в которой движущийся объект наблюдался бы в неизменном виде. Таким образом, кажется, что мозг в процессе конструирования обладает способностью абстрагировать некоторое состояние движения, которое в предположении, что объект обладает заданной формой, согласуется с воспринимаемыми изменениями внешнего вида объекта за некоторый отрезок времени.

Конечно, могут существовать и изменения другого рода, которые не будут поддаваться подобному объяснению (например, предмет может на самом деле увеличиваться в размерах, менять форму и т. д.). Эти изменения должны будут восприниматься уже как более специфические внутренние изменения самого рассматриваемого объекта.

Проблема механизма восприятия движения еще далека от своего окончательного решения. Тем не менее уже стало ясно, что такое восприятие не может быть основано на одних лишь «сигналах чувств» в данный момент времени. Более того, то «внутреннее видение», которое воспринимается нами, включает определенные структурные черты, основанные не только на абстрагировании непосредственных ощущений, но и на последовательности абстракций, полученных из более или менее большого количества прежних восприятий. Именно благодаря этой последовательности абстракций мы способны видеть в мире какой-то установившийся порядок,

организацию, структуру и пр. Даже статическое окружение эффективно представляется в нашем «внутреннем видении» как предположительная и гипотетическая структура, которая, будучи постулирована инвариантной, согласуется с изменениями опыта, приобретенными перцепиентом из своего окружения, из движений, производимых им самим. Окружение же, которое само изменяется, представляется во «внутреннем видении» структурой, выражающейся через инвариантные состояния движения отдельных частей этого окружения, учитывающие изменения опыта, не объясненные собственными движениями перцепиента.

Может возникнуть также неоднозначность при приписывании движений: их можно приписать как наблюдателю, так и отдельным частям окружения. Так, когда человек сидит в неподвижно стоящем поезде и видит в окно, как идет мимо другой поезд, он может почувствовать, что сам движется, и при этом даже пережить некоторые физические (кинестетические) ощущения движения. Но когда он не ощутит ожидаемых толчков и вибраций поезда, он начнет смотреть более внимательно и вскоре обнаружит в своем окружении новые факты, свидетельствующие о том, что движется другой поезд, а его стоит. Внезапно изменится характер его восприятия мира. Это — разительный пример того, что наше восприятие мира есть конструкция «внутреннего видения», основанного на поиске гипотез, согласующихся со всем тем, что мы испытываем в связи с данной ситуацией. Итак, то, что мы воспринимаем, это *не точно* то самое, что находится перед нашими глазами. Мы воспринимаем все в организованной и оструктуренной форме с помощью абстрагирования инвариантов, относящихся к данной ситуации (включая, возможно, инвариант *состояния движения*), которые объясняют наш непосредственный опыт и многочисленные прежние опыты.

Выводы типа только что описанных заставили Гибсона<sup>1)</sup> предложить новый подход к составным частям восприятия. Гибсон настаивает на необходимости от-

<sup>1)</sup> J. G. Gibson, American Psychologist, 15, 694 (1960).

бросить представление о восприятии как о пассивном собирании информации от органов чувств, которая организуется и оструктурируется на основании лишь принципов, исходящих от наблюдателя. Действительно, отдельный импульс информации от органов чувств представляет собой абстракцию чрезвычайно высокого порядка, которая не играет какой-либо существенной роли в реальном процессе восприятия. Вместо этого мы воспринимаем непосредственно структуру самого нашего окружения. В последнем из рассмотренных примеров наблюдатель поэтому не столько *задает* структуру своего восприятия, сколько *абстрагирует ее*. Или — как выражается сам Гибсон — структура нашего окружения является тем *стимулом*, который служит источником нашего восприятия (т. е. источником конструкции нашего «внутреннего видения», возникшего в нашем сознании). Относительно, например, зрительного восприятия Гибсон говорит следующее: через каждый участок пространства во всех направлениях проходит бесчисленное количество лучей света, и в этих лучах в *неявной форме* содержится вся информация о структуре мира, которую мы можем получить с помощью зрения<sup>1)</sup>. Однако глаз, не меняя своего положения, не может абстрагировать эту информацию. Он должен совершить разного рода движения, и по крайней мере часть этих движений должна быть вызвана самим наблюдателем, ибо (как впервые было выяснено Хелдом с сотрудниками) структурная информация абстрагируется главным образом из инвариантных взаимосвязей между центробежными первыми импульсами, приводящими к таким движениям, и соответствующими центростремительными первыми импульсами, полученными в ответ на них.

Гибсон касается и ряда близких вопросов, относящихся к роли времени в восприятии. Таков, например, характерный вопрос: когда некоторый конкретный стимул перестает действовать? Прежде эта проблема

---

<sup>1)</sup> То же соображение применимо и к радиотелескопу, получающему информацию о структуре Вселенной с помощью аналогичной системы радиоволн.

рассматривалась с точки зрения так называемого «фиксированного настоящего момента». Дело в том, что, как было обнаружено, существует отрезок времени порядка одной десятой секунды, воспринимаемый как отдельный фиксированный момент в том смысле, что человек, по видимому, не может ясно различать изменения, происходящие за меньшие промежутки времени. Из этого обстоятельства должно было бы следовать, что все наши восприятия могут в принципе быть упорядочены во времени с точностью до одной десятой секунды. Тем не менее Гибсон ставит вопросы, наводящие на мысль, что попытка понять основные детали процесса восприятия, предполагая в них упорядочение во времени такого типа, может привести к недоразумениям.

Чтобы понять, почему Гибсон подвергает сомнению описанный выше простой метод упорядочения восприятия во времени, напомним, что наше восприятие в значительной мере не отвечает нашим мгновенным ощущениям. Более того, мы воспринимаем фактически абстрагированную из этих ощущений обобщенную структуру, которая формируется в течение некоторого времени. В связи со зрительным восприятием мы уже видели, например, что в некоторый данный момент могут «про-взаимодействовать» выводы, собранные в течение какого-то периода времени, и вызвать возникновение новой структуры воспринимаемого нами. Ясно, что не имеет смысла утверждать, будто эта новая структура основывается лишь на самом последнем выводе — в нее вошла целая система ранее сделанных выводов. Это означает, что время действия данного стимула на наши восприятия не ограничивается каким-то одним наименьшим интервалом времени, который мы способны различить; более того, можно сказать, что отдельные стимулы отвечают гораздо большим промежуткам времени.

Это свойство стимулов гораздо яснее видно на примере музыки. Когда человек слушает какую-нибудь мелодию, то услышанные ранее ноты продолжают еще звучать у него в уме, когда поступает новая нота. Может случиться так, что музыкальную вещь человек понимает (т. е. воспринимает ее структуру в целом) внезапно в некоторый момент в ходе такого процесса. Оче-

видно, что самая последняя из услышанных нот в отдельности не может быть основой для такого понимания: в уме продолжает звучать вся *структура* мелодии. В ней существуют разнообразные взаимосвязи, не ограниченные расположением нот во времени. Способность схватывать такие взаимосвязи существенна для понимания музыки. Попытка увидеть основное содержание музыки лишь в упорядоченности отдельных звуков во времени привела бы к слишком узкому взгляду на этот вопрос и, следовательно, к недоразумениям.

Аналогичным образом можно подойти к вопросу о том, как человек воспринимает ритм. В каждый момент времени можно услышать всего один удар, однако одиночный удар — это еще не ритм. Ясно, что ритм — это продолжительное звучание всей системы ударов в уме человека, причем все они находятся в определенной взаимосвязи между собой, и эта взаимосвязь определяет восприятие ритма.

Действительно, во многих случаях невозможно приписать какой-то данной характеристике воспринимаемого определенного момента времени. Слушая музыкальное произведение, можно следить за ритмом, который определяется многими секундами, за музыкальной темой, для понимания которой требуется прослушивать ее целую минуту или более, при этом мы можем по секундомеру засекают движения руки, соответствующие, вероятно, каким-то долям секунды. Когда человек говорит «теперь», что он под этим подразумевает? Относится ли это к восприятию определенного положения стрелки на его часах или к восприятию определенной части ритма, к восприятию какой-то части темы, а может быть, к чему-нибудь еще?

Кроме того, оказалось бы, что попытки упорядочить все восприятия *в целом* некоторого индивидуума в рамках единой временной последовательности должны привести к недоразумениям и бессмыслице. Так, *могут* быть упорядочены лишь некоторые восприятия (например, такие, как наблюдения за стрелками часов). Однако, чтобы понять процесс восприятия в более широких рамках, мы должны заметить, что воспринимаемые структуры связаны с таким порядком во времени

не настолько жестко, как могли бы заставить нас думать наши обыденные представления. Они упорядочены во времени более свободно в том смысле, например, что наши сегодняшние восприятия не так уж сильно связаны со вчерашними событиями (хотя эти последние в действительности продолжают «звучать» в нас и помогают формировать сегодняшние восприятия). При этом то косное и скоропалительное заключение, что каждое восприятие однозначно упорядочено как более раннее, более позднее или одновременное другому восприятию (в течение «фиксированного настоящего момента»), видимо, приводит к определенным недоразумениям, а это показывает, что такое заключение, вероятно, имеет мало общего с действительной картиной восприятия.

Может быть, было бы поучительно рассмотреть в качестве простого примера физическую задачу, в которой попытка принять временную последовательность событий за основу для понимания явлений приводит к недоразумению, аналогичному возникающему в случае восприятия. Предположим (для того, чтобы этот вопрос вообще мог быть поставлен), что на Марсе обитают какие-то существа и что они занялись изучением радиосигналов, приходящих к ним с Земли. Пусть им удалось принять сигналы нашего телевидения; эти существа не смогут в них разобраться, если будут исходить из предположения, что главное в сигналах — это некоторого рода формула или последовательность взаимоотношений, определяющих их *временную последовательность*. Ведь такие сигналы можно правильно понять, лишь догадавшись, что они образуют ряд *целостных картин*, систематически преобразованных затем в последовательность импульсов во времени. В этом примере последовательность импульсов, формирующих эти картины, не имеет фактически ничего общего с временной последовательностью принимаемых радиосигналов. Подобным же образом структура нашего процесса восприятия также может быть по существу не связана с некоторой гипотетической последовательностью мгновений: она может основываться на совершенно другом принципе, включающем (подобно случаю с телевизионным сигналом) интегрирование того, что воспринимается, по со-

ответствующим отрезкам времени, далеко выходящим за рамки «фиксированного настоящего момента».

Если данная картина восприятия возникает в результате **интегрирования** того, что доходит до нас в течение довольно продолжительного периода времени, то означает ли это, что главным фактором, определяющим общую структуру всего воспринимаемого нами, является *память*? (Память — это способность, например, воскрешать приблизительно те же самые ощущения, события, объекты и т. д., которые были восприняты нами в прошлом.) Гибсон отвергает утверждение, что структура возникает в нашем восприятии *главным образом* на основании памяти, хотя память, конечно, должна *некоторым образом* влиять на формирование наших восприятий. Он полагает, что главное воздействие оказывает процесс, по его выражению, «настройки» на воспринимаемое нами. Так, когда человек видит нечто новое и незнакомое ему, он первоначально грубо воспринимает лишь немногие *общие* структурные характеристики этого объекта. Затем, по мере того как он двигается относительно рассматриваемого объекта и, возможно, исследует его, он начинает абстрагировать уже большее количество деталей структуры объекта и его восприятие обостряется. Этот процесс, вероятно, можно сравнить с образованием навыка, который также опирается не просто на запоминание всех тех упражнений, с помощью которых овладевают навыком.

Как в случае восприятия, так и при образовании навыка человек должен активно взаимодействовать со своим окружением таким образом, чтобы координировались его центробежные и центростремительные первные импульсы. В результате этого существующая в окружении человека структура постепенно включается в характер его центробежных импульсов, так что он научается, как следует обращаться со своим окружением и правильно реагировать на него. Что касается процесса приобретения навыка, то ход его совершенно ясен. Но ведь в некоем смысле восприятие любой вещи — тоже своего рода навык, так как оно требует от человека активного взаимодействия с его окружением, сопровождающегося такими движениями, которые



целесообразны при анализе структуры этого окружения. (Этот факт тоже был бы очевидным, если бы не наше привычное представление, что восприятие — это чисто пассивный процесс.)

Если мы узнаем структуру вещей путем «настройки», то становится ясно, что наиболее общие черты нашей способности схватывать структуру окружающего нас мира во многих случаях опираются на то, что мы познали еще в раннем детстве. Именно здесь изучение процесса восприятия можно связать с работами Пиаже, обсуждавшимися в предыдущем параграфе. Как раз там мы видели, что весь «багаж» младенца первоначально состоит из ограниченного набора врожденных рефлексов. Когда эти последние разовьются в «циклический рефлекс», младенец будет уже располагать самыми основными чертами восприятия, а именно способностью реагировать на взаимосвязь между центробежными и центростремительными нервными импульсами — ту взаимосвязь, которая несет информацию о воспринимаемом объекте. Начиная с этого момента, он уже может постепенно «настраивать» себя на свое окружение, абстрагируя из взаимосвязей то, что инвариантно в общей структуре. Таким путем он формирует свои представления о пространстве, времени, причинности, делении мира на неизменные объекты (одним из которых является он сам), о неизменном веществе, неизменном числе объектов и т. д. и т. п. Все эти представления органически входят в состав восприятия в том смысле, что они помогают формировать структуру картин нашего «внутреннего видения» в нашем сознании. Поэтому, когда мы способны «настроиться» на новые виды структур, встретив нечто новое, то обнаруживаются некоторые общие структурные характеристики, типа описанных выше, которые мы впервые усвоили в детстве и которые присутствуют во всем воспринимаемом нами.

Предельную или общую структуру нашего полного процесса восприятия можно рассматривать не только с точки зрения ее развития с младенческих лет; можно также исследовать ее непосредственно у взрослых людей. Такие исследования были проведены Хелдом и его

группой<sup>1)</sup> на изолированных индивидуумах, окружение которых почти или совсем не содержало поддающихся восприятию объектов. Крайним вариантом такой изоляции являлось погружение человека в сосуд с водой при температуре комфорта, причем он ничего не видел и не слышал, а покрытие на его руках препятствовало получению осязательных ощущений. Те лица, которые были достаточно смелы, чтобы предоставить себя для таких опытов, вскоре обнаруживали, что структура их поля восприятия начинала изменяться. Все более и более частыми становились галлюцинации и самовнушаемые восприятия, а также нарушения восприятия времени. Когда, наконец, период изоляции испытуемого заканчивался, обнаруживалось, что он потерял в значительной степени общую ориентацию, причем не только в отношении своих переживаний, но и в отношении своей способности восприятия. Например, люди после этого часто оказываются неспособными отчетливо видеть формы объектов, а иногда даже воспринимали эти формы в неизменном виде. Они видели изменение цвета там, где оно не произошло, и т. д. и т. п. (Конечно, с течением времени нормальное восприятие восстанавливается.)

Результаты таких опытов довольно трудно понять во всех деталях, однако наиболее общая их черта заключается в том, что общие структурные элементы «настройки», установившиеся в мозгу с раннего детства, имеют тенденцию распадаться, когда им не приходится сталкиваться с окружением, обладающим соответствующей структурой. Если сравнить эти элементы настройки с некоторого рода навыками, необходимыми для общения с нашим стандартным окружением, то, вероятно, не покажется слишком неожиданным и их распад, когда они не используются. Тем не менее удивительно, насколько быстро могут распадаться такие «навыки», которые приобретались в течение всей нашей жизни. Для объяснения этого факта было сделано предположение, что при

<sup>1)</sup> См. обзор: R. Held, S. J. Freedman, *Science*, 142, 455 (1963), а также материалы Симпозиума по проблеме утраты органов чувств, *The Journal of Nervous and Mental Diseases*, No. 1, January, 1961.

отсутствии внешнего окружения, с которым «привык» работать мозг, последний начинает взаимодействовать с внутренним окружением, т. е. с импульсами, спонтанно возникающими в самой нервной системе. Однако эти импульсы фактически не обладают какой-либо определенной структурой, которую можно было бы как-то понять. Поэтому при попытке активно «настроиться» на структуру, которая либо не отвечает ничему реальному, либо недоступна для понимания людей, над которыми производится эксперимент, прежние приспособления, сформировавшиеся у этих людей в течение всей их жизни, запутываются и разрушаются.

Изложенная гипотеза до некоторой степени подтверждается опытами, в которых испытуемые в течение длительного времени смотрели на телевизионный экран, содержащий лишь изменяющиеся беспорядочные (бесструктурные) сочетания пятен. Это приводило к нарушению восприятия, аналогичному тому, которое имело место в опытах с изолированными испытуемыми. Поэтому можно утверждать, что при попытках приспособиться к структуре, несуществующей или непонятной в обычном окружении, мозг начинает ликвидировать прежнюю структурную «настройку», которая была пригодна при естественном окружении, присущем нашей обычной жизни.

Результаты этих экспериментов настолько радикальны, что они могут даже смутить нас. Тем не менее можно видеть, что в целом они имеют тенденцию идти по тому же пути, по которому вели нас опыты Пиаже, а также упомянутые ранее. Дело в том, что во всех этих случаях мы видели, что в восприятии участвуют центробежные нервные импульсы, вызывающие движения, в ответ на которые поступают координированные с ними центростремительные ряды импульсов. Способность абстрагировать из всех этих нервных импульсов некоторую инвариантную взаимосвязь и является основой интеллектуального восприятия. Это обусловлено тем, что структура, представленная во «внутреннем видении», определяется необходимостью учитывать инварианты во взаимосвязях между центробежными двигательными импульсами и центростремительными импульсами, несущими

щими ощущения. При этом перципиент не только постоянно познает свое окружение, но и *меняется сам*. Другими словами, в его нервной системе создается некоторое отражение общей структуры окружения. До тех пор, пока его общее окружение по своей структуре не слишком сильно отличается от того, что уже было создано в его нервной системе, он в состоянии приспособиться к нему путем «настройки» на новые характеристики окружения. Однако в окружении, не содержащем такой структуры, способность к «настройке» утрачивается в процессе поисков новой структуры, которая либо просто не существует, либо, если существует, обладает свойствами, не поддающимися пониманию и усвоению ее перципиентом.

Эти выводы возвращают нас к старому вопросу, впервые сформулированному Кантом: вытескает ли наш метод познания мира как упорядоченного и структурно организованного в пространстве и во времени с учетом причинных взаимосвязей и прочего из объективной внутренней природы самого мира или он *налагается* на мир нашим собственным рассудком? Кант предположил, что эти общие принципы — некоторый вид *априорного* знания, заложенного в нашем рассудке, являются необходимым предварительным условием того, чтобы вообще осуществлялся какой бы то ни было поддающийся пониманию опыт, но сами по себе эти принципы могут не характеризовать свойств «вещей в себе».

Казалось бы, что утверждение Канта в некоторых отношениях правильно, однако оно в корне ошибочно, так как Кант рассматривал эту проблему под слишком узким углом зрения. Совершенно бесспорным является то, что в каждый данный момент новому опыту отвечает некоторая конкретная структурная «настройка» нашего мозга — это есть необходимое условие восприятия поддающихся узнаванию аспектов мира. Именно благодаря возможности такой «настройки» мы способны в каждый момент времени видеть более или менее фиксированные системы вещей, организованные в пространстве, причинно связанные друг с другом, изменяющиеся в простой временной последовательности и т. д. Когда такая «настройка» нарушается при долгой изоляции

(описанного выше типа) или при восприятии окружения, лишённого видимой структуры, то упоминавшиеся опыты безусловно показывают, что процесс накопления осознанного опыта об окружении серьезно нарушается.

С другой стороны, более широкий подход к этой проблеме показывает, что настройка взрослого человека на общую структуру мира развивалась и строилась с самого детства. В начале такого развития ребенок должен *открывать* структуру своего окружения в ходе длительных *экспериментов* с ним, оперирования им и т. д. Используемая при этом процедура, вероятно, в основном не отличается от обычной процедуры научного исследования. Ребенок *интересуется* своим окружением: исследует его, испытывает, наблюдает и т. д. и постоянно развивает все новые перцептуальные «гипотезы» своего «внутреннего видения», которые лучше всего объясняют его опыт. Делая все это, он «настраивается» на свое окружение, развивает правильные реакции для адекватного восприятия структуры этого окружения. С возрастом весь этот процесс переходит в привычку. Однако, как только человек сталкивается с чем-либо странным и неожиданным, он оказывается способным абстрагировать новые структурные конструкции, продолжив те интересующие его опыты и наблюдения, которые были так характерны для раннего детства.

Конечно, человеку трудно изменить *самые общие* структурные представления, например организацию всего своего опыта в пространстве, во времени, с учетом причинности и пр. Однако упоминавшиеся выше эксперименты показывают, что, видимо, нет внутренней необходимости удерживать какую-либо специальную структуру; мозг, вероятно, наделен способностью абстрагировать весьма обширное множество структурных конструкций разного рода, которые фактически могут присутствовать в какой-то части того окружения, которое доступно органам чувств человека, если только у него имеется соответствующий интерес, приводящий к определенного рода экспериментированию, исследованию и т. д. В каждый данный момент времени та структура, которую мы уже знаем, зависит от прошлого опыта, от привычек и т. д.; последние в свою очередь диктуются тем общим

окружением, в котором реально жили эти люди, и отчасти — теми интересами, которые определяют, на какие структурные детали эти люди обращали внимание. Поэтому мы подходим к новому опыту, как и полагал Кант, уже с некоторого рода заранее принятыми общими структурными принципами. Однако из упоминавшихся выше экспериментов следует еще и то, что Кант ошибался, рассматривая каждый из видов этих принципов как *неизбежно* следующий *априори* из самой природы человеческого рассудка. Более того, если следовать подходу, предложенному Гибсоном, представляется, что человек мог бы «настроиться» на любые структурные детали своего окружения, на которые только способна отзываться его нервная система и в которых он будет достаточно заинтересован.

На основании описанных выше представлений можно сказать, что, несмотря на то, что наши восприятия действительно содержат субъективный элемент, зависящий от частного фона и от условных связей каждой личности (кондиционирования), равно как и от общего фона и от условных связей всего человечества, они имеют также и объективное содержание, выходящее за рамки этого частного и ограниченного фона. Дело в том, что *общая* структура наших восприятий (обусловленная этим фоном) может рассматриваться как род *гипотезы*, с помощью которой мы подходим к дальнейшим опытам, где вещи изменяются не только сами по себе, но и благодаря нашим собственным движениям, действиям и исследованиям, меняющим нашу собственную связь с нашим окружением. В той мере, в какой новые опыты продолжают развивать без возникновения противоречий старую структуру, эти гипотезы эффективно подтверждаются. Но если мы будем бдительны, то почувствуем противоречия, к которым они приводят (как мы уже видели в многочисленных примерах, обсуждавшихся ранее). Как только это произойдет, наш мозг проявит свою чувствительность и откроет новые взаимосвязи, непосредственно приводящие к следующим гипотезам, которые воплощаются в новые структуры нашего «внутреннего видения». Всякий может испытать это, приближаясь к удаленным объектам, прежде неизвестным ему,

или приближаясь к чему-либо, выглядящему необычно при слабом освещении, например при лунном свете. Он будет видеть при этом разнообразные формы, очертания, объекты и т. п., которые возникают, а затем исчезают, так как они оказываются не согласующимися с дальнейшим опытом, приобретаемым им при новых движениях, испытаниях и т. д. Итак, происходит непрерывное применение «метода проб и ошибок»; при этом все, что оказывается ложным, постоянно отбрасывается, и столь же постоянно выдвигаются новые структуры на предмет их «критики». В конце концов таким путем формируется восприятие, которое сохраняется при последующих движениях, испытаниях и т. д., в том смысле, что предсказываемые им факты действительно подтверждаются этими опытами. (Конечно, даже и это восприятие всегда чувствительно к эксперименту в том смысле, что позднее могут обнаружиться противоречащие ему факты.)

Объективное содержание нашего восприятия состоит, таким образом, в процессе опровержения и подтверждения, описанном выше. На самом деле тот факт, что наше «видение мира» может быть опровергнуто в результате последующих движений, наблюдений, испытаний и пр., показывает, что мир более богат, чем мы его воспринимаем и знаем. Иначе говоря, мы в действительности не творим мир — фактически мы создаем лишь наше «внутреннее видение» мира в ответ на наши движения и ощущения. Однако возможность подтверждения «внутреннего видения» показывает, что оно — нечто большее, чем просто сумма прошлых опытов. Ведь это «внутреннее видение» основано на абстрагировании *общей структуры* таких прежних опытов — структуры, позволяющей предсказывать результаты будущих опытов. Например, когда мы приближаемся к такому объекту, как дом, с фасада, мы — в значительной мере невольно — предсказываем большое число структурных деталей тех частей этого объекта, которые еще не видим. Так, рассматривая фасад и одну сторону дома вместе с частью его крыши, мы заключаем, что у дома есть и другие стороны, что они имеют определенные параллельные линии, образуют определенные углы и т. д. Эти заключения могут основываться *отчасти* на памяти — ведь

раньше мы ходили вокруг аналогичных домов. Однако в значительной части они основываются не просто на воспоминании о прежнем опыте как таковом, а на общих структурных принципах, которые были абстрагированы из весьма широкого круга таких опытов (например, трехмерность пространства, существование прямых линий, параллельных линий и прямых углов — все это, вместе взятое, дает некоторое общее поле возможностей для предсказания того, какими могут быть невидимые части объекта независимо от тех конкретных воспоминаний о подобных объектах, которыми мы могли обладать).

Достаточно немного подумать, чтобы убедиться, в каком огромном числе случаев оказывались правильными предсказания вышеописанного типа, основанные на общей структуре наших восприятий. Иначе говоря, тот «мир», который мы видим в нашем непосредственном восприятии, обладает в данный момент *общей* структурой, выдержавшей целый ряд испытаний в тех наблюдениях, которые были нами произведены до этого момента. При этом, как правило, оказывается, что естественная проекция его структуры (с учетом известного состояния движения наблюдателя) и всего присутствующего в поле восприятия будет и впредь более или менее согласовываться с последующими наблюдениями в целом ряде отношений. Это означает, что общая структура нашего восприятия обладает определенным сходством с общей структурой того, что действительно существует в нашем окружении. Однако такое сходство не абсолютное, о чем свидетельствует появление противоречий, неожиданных явлений и т. д. Все это неизбежно приводит к непрерывному изменению того, что было ранее сконструировано в поле восприятия, и, таким образом, этот процесс не сводится просто к естественному продолжению проектирования прежнего восприятия. Мы непрерывно сталкиваемся с тем, что в наших восприятиях не содержалось даже неявно, и это напоминает нам о существовании некоторой реальности сверх той, которую мы уже воспринимали и аспекты которой всегда появляются в наших дальнейших восприятиях.



#### § 4. АНАЛОГИЯ МЕЖДУ ПРОЦЕССОМ ВОСПРИЯТИЯ И ПРОЦЕССОМ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МИРА

В предыдущих параграфах приложения мы обсуждали результаты исследований развития процесса восприятия отдельной человеческой личности в раннем детстве, а также результаты непосредственных исследований этого процесса у взрослых людей. На основании выводов, полученных при этих исследованиях, можно сформулировать утверждение, что в процессе восприятия мы получаем информацию о мире главным образом благодаря чувствительности к инвариантам во взаимосвязях между нашими собственными движениями, действиями, испытаниями и пр. и ответной реакцией, которую воспринимаем нашими органами чувств. Такие инвариантные взаимосвязи сразу же отражаются в нашем сознании в виде «конструкций» во «внутреннем виде-нии», включающих в себя фактически гипотезу, которая объясняет инвариантные характеристики, найденные нами вплоть до настоящего момента в подобного рода опытах. Эта гипотеза, однако, носит экспериментальный характер в том смысле, что она заменяется другой, если при наших последующих движениях, испытаниях и т. д. мы наталкиваемся на факты, противоречащие выводам наших «конструкций».

Мы видели, однако, на протяжении этой книги, что основные черты процесса исследования в физике очень похожи на черты процесса восприятия, описанного выше, и что в ходе дальнейшего развития физики, при переходе ее к более современным концепциям (например, в связи с теорией относительности), такая аналогия проявляется все отчетливее. Так, те стороны механики Ньютона, которые в конце концов нашли свое подтверждение, состояли в открытии инвариантности определенных соотношений (законов движения Ньютона) для широкого круга систем, движений, переходов между системами отсчета и т. д. Напротив, те стороны теории, которые, как считалось, описывают абсолютные характеристики (т. е. абсолютное пространство, абсолютное время, представление о неизменном веществе, постоянстве масс и т. д.), в конце концов оказались не только ненужными,

по и главными источниками недоразумений и ошибок при попытках распространить научные знания о законах движения на более широкий круг явлений. Важнейший шаг, сделанный Эйнштейном, основывался на отказе от подобных представлений об абсолютном и распространении на более широкую область представлений о законах физики как об инвариантных взаимосвязях (например, распространении этих представлений на область, включающую скорости, сравнимые со световой). Сделав это, он был уже вынужден отказаться от представления о фиксированном количестве вещества с постоянной массой. Вместо этого он ввел представление о массе как просто об относительно инвариантном свойстве, характеризующем соотношение между энергией тела и его инерцией (способностью противостоять ускоряющей силе) равно как и его гравитационными свойствами. Дальнейшее развитие современной физики, включая квантовую теорию и исследования превращений так называемых «элементарных» частиц (см. обсуждение в гл. 23), наводит на мысль, что, по-видимому, представление о неизменных сущностях, состоящих из веществ с постоянными качественными и количественными свойствами, следует вовсе отбросить и что для физики остается лишь возможность изучать относительные инварианты для как можно более обширного многообразия движений, преобразований координат, изменений перспективы и т. д.

Более того (как мы видели в гл. 24), оказывается, что утверждение, будто наука — это собиране абсолютных истин о природе или даже приближение к таким истинам в сходящейся последовательности, не находится в удовлетворительном согласии с фактами действительного развития научных теорий (до настоящего времени), и оно было фактически главным источником недоразумений при научных исследованиях. Как подчеркнул профессор Поппер, прогресс науки на самом деле осуществляется скорее путем выдвижения гипотез, которые подтверждаются до определенного момента, а потом, как правило, опровергаются. Затем выдвигаются новые гипотезы, подвергающиеся критике и проверке по «методу проб и ошибок», весьма напоминающем построение нашего непосредственного восприятия.

Интересный факт, который вытекает из одновременного рассмотрения развития современной науки и новейших открытий в области процесса восприятия, заключается в том, что новые идеи, необходимые для понимания и того, и другого, очень похожи. В этом параграфе мы изложим некоторые доводы в пользу той мысли, что эта аналогия не является случайной и что за ней кроется глубокая причина. Предполагаемая нами причина состоит в том, что научное исследование — это в основном способ расширения нашего *восприятия* мира, а вовсе не способ получения *знаний* о нем. Иными словами, наука занимается поисками новых сведений, существенная роль которых сводится к дополнительному расширению процесса восприятия. И если наука есть в основном способ расширения восприятия, то тогда, как мы попытаемся показать, вполне естественно, что некоторые важные стороны научного исследования будут весьма аналогичны соответствующим сторонам непосредственного восприятия<sup>1)</sup>.

Поскольку до настоящего времени наука обычно рассматривалась как *главным образом* собирание знаний, то нужно начинать с более глубокого анализа вопроса о взаимосвязи между знанием и непосредственным восприятием. Как мы уже видели, все, что появляется в непосредственном восприятии, содержит некоторого рода абстракцию общей структуры взаимосвязей, инвариантность которых была обнаружена ранее в активном процессе исследования окружения; это и привело к рассматриваемому восприятию. Мы предлагаем рассматривать знание как *абстракцию более высокого порядка*, основанную на том, что оказалось инвариантным в широком круге опыта, включая и непосредственное восприятие.

Смысл этого утверждения, вероятно, можно разъяснить более непосредственно, обратившись сначала к данным Пиаже о развитии представлений о пространстве у детей (см. обсуждение в § 2 настоящего приложения).

<sup>1)</sup> Многие авторы уже отмечали аналогию между научным исследованием и восприятием. См., например, N. H. Hanson, *Patterns of Discovery*, New York, 1958; T. Kuhn, *The Nature of Scientific Revolutions*, Chicago, 1963.

Прежде всего ребенок открывает группу операций, при которых он может попасть из одного места в другое по некоторому пути и вернуться инвариантным образом на то же самое место по целому ряду разных путей. Позднее ребенок обретает способность *представлять себе* пространство (т. е. составлять мысленный образ его), содержащее даже те объекты, которых уже нет более в поле его непосредственного восприятия, а также представлять себе и воображаемый объект, отвечающий *ему самому*. Структура этого мысленного образа вполне соответствует тому, что ребенок нашел инвариантным в своем предыдущем опыте с группами движений. Поэтому такой мысленный образ *абстрагирует* некоторого рода «инвариант высшего порядка», т. е. нечто, обнаружившее свою инвариантность при непосредственном восприятии в широких рамках.

Говоря «абстрагирует», мы и не думаем утверждать, будто речь идет просто о процессе индукции или о проведении какого-либо суммирования приобретенного ранее опыта. Более того, каждый акт абстрагирования состоит в принятии некоторой «гипотезы» для того, чтобы объяснить уже обнаруженные в предыдущем опыте инварианты. При этом выбираются лишь те абстракции, которые выдерживают дальнейшие проверки и испытания. Они становятся в конце концов привычными, и мы забываем об их исходном гипотетическом и предположительном характере, начиная считать их присущими и необходимыми чертами всего существующего—во всех возможных областях и уровнях нашего опыта и наших исследований.

Далее Пиаже переходит к описанию того, как с развитием языка и логического мышления ребенок переходит к построению абстракций еще более высокого порядка, когда имеются уже оформленные конструкции из слов, идей, представлений и пр., выражающих инвариантные характеристики мира, абстрактно анализируемые им в его восприятии. В принципе, очевидно, такому процессу абстрагирования нет предела. Например, можно сказать, что естественные науки и математика строят абстракции еще более высокого порядка (выраженные словами, диаграммами и математическими

символами) для описания инвариантных характеристик, обнаруженных при экспериментах и наблюдениях (в последнем случае это делается на языке обычных абстракций нашей каждодневной разговорной речи и здравого смысла). Итак, все познание — это структура из абстракций, окончательная проверка которых состоит, однако, в процессе взаимодействия с миром, что и осуществляется при непосредственном восприятии.

Критический момент в этом всеобъемлющем процессе абстрагирования можно усмотреть в выделении некоторых элементов нашего «внутреннего видения», которые не относятся *прямо* к непосредственному восприятию. Это то, что мы *воображаем*, заключаем, символизируем, о чем думаем и т. д. Эти элементы затем, видимо, становятся по отношению к непосредственному восприятию абстракциями, отражающими общие структурные построения этого восприятия, — в значительной степени так, как карта отражает ту территорию, которая на ней изображена <sup>1)</sup>. Но как было отмечено в § 2, маленький ребенок не умеет быстро отличать воображаемое от получаемого в ответ на непосредственное восприятие. Таким путем возникает привычка смешивать наши абстрактные концептуальные «карты» с самой реальностью, и мы не замечаем, что это всего лишь карты. Когда ребенок подрастет, он сможет избежать такого смешивания в вопросах, касающихся внешней стороны явлений, но чуть только он перейдет к фундаментальным понятиям, таким, как пространство, время, причинность и пр., то это будет делать все труднее. В результате и взрослый человек сохраняет привычку смотреть на свои относительно абстрактные концептуальные карты как на присущие природе вещей, а не как на абстракции высокого порядка, обладающие лишь некоторой структурной аналогией с тем, что было найдено инвариантным на низших порядках абстрагирования. Именно такое смешивание, основанное на длительно держащейся привычке, и делает столь затруднительным ясный анализ этих фундаментальных проблем.

---

<sup>1)</sup> См. также гл. 29, где подобная же роль в физике придается диаграммам Минковского.

Возможно, что лучше всего можно проиллюстрировать эти соображения на следующем простом примере. Допустим, что мы смотрим на круглый диск. Его проекция на сетчатку глаза (т. е. непосредственно воспринимаемый вид) будет иметь форму эллипса (как это, например, изобразил бы художник, попытавшийся нарисовать диск в перспективе). И тем не менее мы *знаем*, что на самом деле это круглый диск. На чем же основывается такое знание?

Как было уже отмечено, глаза, голова, наше тело и т. д. всегда находятся в движении. При этом внешний вид диска непрерывно изменяется, подвергаясь фактически последовательным *проективным преобразованиям*, определенным образом связанным с этими движениями. Наш мозг обладает способностью различными путями (некоторые из них обсуждались в § 3) абстрагировать инварианты во всех этих движениях, изменениях перспективы и т. д. Эта абстракция, сводящаяся к утверждению, что только образ круглого объекта объясняет все изменяющиеся виды диска, является основой «конструкции», воспринимаемой нами во «внутреннем видении». «Гипотеза», что этот объект на самом деле является круглым, испытывается и проверяется затем при дальнейших перцептуальных контактах с объектом, и мы продолжаем придерживаться ее до тех пор, пока она выдерживает такие проверки и испытания.

Но понимание, что воспринимаемый объект является круглым, зависит также от знания, выходящего за рамки непосредственного восприятия. Так, с раннего детства человек учится *представлять себе*, как выглядит объект (даже рассматривая его с одной стороны, он воспринимает предмет круглым, как если бы он его ощупывал). Позднее он мог бы научиться представлять самого себя в виде точки на диаграмме, прослеживая путь световых лучей от окружности до своего места наблюдения и получая, таким образом, возможность понять, как круглый предмет приобретает в перспективе вид эллипса. Получив дальнейшее образование, человек способен перейти к еще более высокому уровню абстрагирования и математическим путем вычислить правильную форму диска, зная, как он выглядит, если смотреть из разных

точек, и зная, как в этих точках расположены относительно друг друга наблюдатель и объект (расстояние между ними и т. д.). Выполняя такое вычисление, он делает сознательно на высшем уровне абстрагирования то, что самопроизвольно делает его мозг на низшем уровне, т. е. находит ту единую структуру, которая объясняет инварианты в наших изменяющихся взаимосвязях с рассматриваемым объектом.

Мы видим теперь, что не существует *резкой* границы между абстракциями непосредственного восприятия и абстракциями, составляющими наши познания, даже если эти познания относятся к высшему уровню, достигнутому естественными науками и математикой. В самом начале наше непосредственное восприятие выражает «конструкцию» нашего «внутреннего видения», основанную на подсознательной абстракции инвариантов в нашем окружении или в тех процессах, с помощью которых мы вступаем с этим окружением в контакт. На каждом более высоком уровне абстрагирования повторяется подобный процесс открытия инвариантов на низких уровнях, и эти инварианты затем представляются в виде картин, образов, символических структур из слов и формул и пр. Такие абстракции на более высоких уровнях вносят вклад в общую структуру абстракций на низших уровнях, вплоть до абстракций непосредственного восприятия. Так между всеми уровнями абстрагирования осуществляется постоянное двустороннее взаимодействие.

Обратимся, например, к опыту наблюдения за ночным небом. В древности люди абстрагировали из звезд фигуры животных, людей и богов, в результате чего не были в состоянии смотреть на небо, не представляя себе на нем всего этого. В наши дни люди знают, что за зрительным образом неба стоит непомерно гигантский мир звезд, галактик, скоплений галактик и т. д. и что каждое существо, находясь в этом мире в каком-то месте, видит его под определенным углом зрения, и эта перспектива воспринимается как ночное небо. Современные люди не видят в небе животных, богов и т. п., они видят гигантскую Вселенную. Но даже и представления современной науки верны, вероятно, лишь в определенных

границах. Поэтому человек будущего, может быть, составит совершенно другое представление о том инвариантном целом, которое стоит за видимым нами образом ночного неба, а наше современное о нем представление будет рассматриваться, вероятно, как упрощение, приближение и предельный случай, но уж во всяком случае не как что-то совершенно правильное. Разве тогда нельзя сказать, что, поднимаясь на новую ступень развития, люди расширяют свое восприятие ночного неба, переходя от одного уровня абстрагирования к другому и приходя с каждым шагом к новой гипотезе о том, что инвариантно — что может наилучшим образом удовлетворять дальнейшим проверкам, испытаниям и пр.? Но если это так, то и самые абстрактные и общие научные исследования — это естественное продолжение того самого процесса, с помощью которого маленькие дети учатся вступать в перцептуальный контакт со своим окружением.

Как мы уже указывали в нескольких случаях (см., например, обсуждение работы Пиаже в § 2 и обсуждение вопроса о восприятии движения в § 3), одной из основных проблем, которые необходимо решить при каждом акте восприятия, является проблема учета конкретной точки зрения и перспективы наблюдателя. Ее решение существенным образом зависит от использования ряда уровней абстрагирования, каждый из которых соответствующим образом связан с другими. Поэтому человек не только непосредственно воспринимает эллиптический вид наблюдаемого впереди диска, он воспринимает также изменения видимой формы этого диска в результате тех движений, которые активно предпринимает сам наблюдатель. Его мозг способен абстрагировать из этих изменений информацию о его взаимоотношении с диском (например, о расстоянии до него). При этом существенно, что с помощью многих уровней абстрагирования, одновременно осуществляющихся в мозгу, оказывается возможным воспринимать не только проекцию рассматриваемого объекта, но и его взаимоотношение с наблюдателем. Отсюда в принципе всегда можно получить инвариантное представление о том, что происходит в действительности. Этому отвечает абстрагирование на



высоком уровне, когда, например, мы представляем себе пространство, содержащее диск и самого наблюдателя и отражающее их взаимоотношение. Когда кто-то говорит, что данный объект *на самом деле* круглый, то, очевидно, он не ссылается на непосредственное ощущение формы объекта; это утверждение есть следствие процесса дальнейшего абстрагирования, главные результаты которого представляются в этом воображаемом пространстве, содержащем как объект, так и говорящего.

Совершенно аналогичная проблема возникает в науке. Здесь руки, тело и органы чувств наблюдателя обычно как бы продолжены с помощью соответствующих приборов, которые обладают в *определенных отношениях* большей чувствительностью, большей разрешающей силой и большей степенью точности, чем эти органы, а также позволяют приходить в контакт с миром качественно по-новому. Но в том главном отношении, что наблюдатель *активно* исследует и испытывает свое окружение, эта ситуация весьма аналогична той, которая имеет место при непосредственном восприятии, без использования таких приборов.

При этом исследовании всегда наблюдается реакция на наши воздействия, и из взаимосвязей между изменениями такой реакции и известными нам изменениями состояния приборов мы получаем относительную информацию с том, что наблюдается (точно так же, как это происходит при непосредственном использовании самих органов чувств).

Однако, как и в случае непосредственного восприятия, такие наблюдения имеют очень малое значение, пока не известна взаимосвязь между прибором и наблюдаемой областью явлений. Эту взаимосвязь можно выяснить с помощью ряда абстракций. Таким образом, в каждом эксперименте известен не только результат наблюдения, но и конструкция прибора, принципы его действия и т. д., причем все это выясняется с помощью разнообразных предыдущих наблюдений и действий. Иными словами, каждый акт наблюдения включает и неявное наблюдение самого используемого прибора, выполняемое на разных уровнях концептуального абстрагирования. Но чтобы *понять* наблюдаемое, необходимы

всегда определенные способы подхода к проблеме, в которых совместно представлены как прибор, так и предмет наблюдения. Тогда и можно увидеть «цельную картину», в которой совокупность инвариантов наблюдаемого находится в определенной зависимости от прибора, и эта зависимость определяет, как такие инварианты «проектируются» на определенные регистрируемые реакции прибора.

В гл. 29 мы уже обратили внимание на частный случай обсуждавшейся выше проблемы. Именно в теории относительности пользуются диаграммами Минковского, с помощью которых можно в принципе представить все события, имеющие место во всем пространстве-времени. Однако в каждой конкретной диаграмме такого рода должна иметься линия, соответствующая мировой линии того наблюдателя, о результатах которого идет речь. На диаграмме она обычно играет роль оси времени. Если же мы захотим говорить о результатах, полученных другим наблюдателем, мы должны включить в эту диаграмму изображение и *его* мировой линии. Подобным же образом необходимо выбрать точку, изображающую место и время, определяющие перспективу данного наблюдения. Приняв все это во внимание, можно на основании реакции наблюдательных приборов (которая *существенно связана* с их скоростью, временем, местом наблюдения и пр., т. е. *относительна*) рассчитать инвариантные свойства наблюдаемой картины, причем факт получения разными наблюдателями разных результатов объясняется разной *взаимосвязью* этих наблюдателей и исследуемого процесса. Отсюда можно заключить, что теория относительности подходит к нашему миру тем же путем, каким человек подходит к своему окружению при непосредственном восприятии. В обоих случаях все наблюдаемое основано на абстрагировании того, что представляется инвариантным при различных движениях, с разных точек зрения, под разным углом, в разных системах отчета и т. д. И в обоих случаях инвариант в конце концов удастся понять с помощью различных гипотез, выраженных на языке абстракций и на высших уровнях и служащих своего рода «картой», обладающей упорядоченностью, видом и структурой,

похожими на такие же характеристики предмета наблюдения.

Тенденция превращать в привычку использование таких карт свойственна как научному исследованию, так и непосредственному восприятию. Когда это происходит, мышление человека оказывается ограниченным тем, что согласуется с этими картами, ибо человек считает, что в них есть все, что вообще может быть — при всех условиях и во всех областях опыта. Например, представление здравого смысла об одновременности всего того, что совместно присутствует в нашем непосредственном восприятии, при абстрагировании привело к ньютонову представлению об абсолютном времени. В результате нам кажется внутренне противоречивым тот случай, когда два брата-близнеца, подвергнутые разным ускорениям, а затем вновь встречающиеся друг с другом, должны испытать разное изменение времени (см. гл. 28). Но в § 3 мы видели, что представление о едином однозначном времени, по-видимому, не может без недоразумений применяться также и в области нашего непосредственного восприятия. На это обстоятельство было обращено так мало внимания главным образом, вероятно, потому, что мы привыкли относиться серьезно лишь к тому, что согласуется с нашим привычным восприятием всего (происходящего как внутри, так и вне нас), как подверженного такому единому и универсальному упорядочению во времени.

Можно, кстати, отметить, что описанный здесь подход нашел еще более далеко идущее приложение в квантовой теории. Причина этого существенно связана с неделимостью кванта, приводящей к тому, что, когда мы наблюдаем нечто на атомном уровне с весьма высокой степенью точности, то оказывается, что должно иметь место неустранимое возмущение наблюдаемой системы тем квантом, который потребовался для наблюдения (факт, используемый при выводе знаменитого принципа неопределенности Гейзенберга). На уровне крупных масштабов действием таких квантов можно пренебречь. Поэтому, хотя наблюдатель должен активно производить движения и воздействовать на объект, чтобы прийти к восприятию чего-либо, он может в прин-

ципе (по крайней мере в крупномасштабном зрительном восприятии) действовать без значительного возмущения наблюдаемой им системы. При тех степенях точности, которые необходимы на атомном уровне, ситуация, однако, совсем другая. Здесь кванты света можно сравнить с пальцами слепого, которые могут обеспечить его информацией об объекте, если только они ощупывают и возмущают объект. Слепой тем не менее способен абстрагировать определенные инвариантные свойства объекта (например, размеры и форму), но при этом его мозг самопроизвольно *принимает во внимание* те движения, которым подвергается объект в ходе его перцептуальных операций. Подобным образом физик способен абстрагировать определенные инвариантные свойства атомов, электронов, протонов и т. д. (заряд, массу, спин и пр.), однако он должен при этом сознательно учитывать, какие *операции* использовались при его наблюдениях. (Подробное обсуждение этого вопроса, конечно, выходит за рамки нашей книги; эти вопросы, однако, автор надеется рассмотреть отдельно.)

## § 5. РОЛЬ ВОСПРИЯТИЯ В НАУЧНОМ ИССЛЕДОВАНИИ

В обсуждении, проведенном выше, было отмечено близкое сходство наших методов непосредственного восприятия мира и наших методов подхода к нему в современных научных исследованиях. Мы продолжим здесь непосредственное рассмотрение перцептуального по своей сущности характера научных исследований, предположение о котором было нами сделано в начале § 4.

Несмотря на то, что научные приборы, сделанные людьми, служат, как мы видели, как бы эффективным продолжением человеческого тела и органов чувств, все же не существует *внешних* структур, заменяющих *внутреннюю* сторону процесса восприятия (в котором инвариантные характеристики испытываемого нами формируют «внутреннее видение»). Поэтому дело *самого ученого* — выявить существующие противоречия между его гипотезами и наблюдаемыми фактами. Ученый должен быстро учитывать новые взаимосвязи в наблюдаемом

и выдвигать предположения или гипотезы, которые объясняли бы известные ему факты, включая и эти новые взаимосвязи; такой подход позволяет применять полученные результаты к еще не изученным явлениям и проверять их в последующих экспериментах и наблюдениях. Таким образом, мы всегда приходим к такому этапу, когда в научном исследовании необходим *в сущности перцентуальный процесс* — процесс, протекающий в уме самого ученого.

Важность перцентуального этапа обычно склонны преуменьшить, потому что исследователи обращают внимание главным образом на следующий за ним этап, в котором гипотезы, выдержавшие ряд проверок, вливаются в русло знания, общепринятого на данной ступени развития науки. В результате приходят к мысли о том, что основная роль ученого состоит в *аккумуляции проверенных знаний* и что этой цели подчинены в конечном счете все остальные усилия ученого.

Если бы такие знания представляли собой систему абсолютных истин, то имелся бы по крайней мере хоть какой-нибудь смысл видеть главную цель науки в их аккумуляции. Однако, как мы уже отмечали, судьба всех теорий — быть когда-нибудь опровергнутыми, т. е. теории — это всегда относительные истины, адекватные в некоторых областях, включающих как то, что уже наблюдалось, так и некоторые еще не известные области, границы которых могут быть (по крайней мере до некоторой степени) определены при последующих экспериментах и наблюдениях. Но если все обстоит именно так, то само накопление знаний не может считаться *основной* целью научного исследования просто потому, что справедливость всякого знания определяется по отношению к тому, что само в состав этого знания не входит. Так, чтобы говорить о научном исследовании как о имеющем реальное содержание, мы должны выяснить область его применимости (известную по необходимости неполно), а для этого непрерывно сопоставлять твердо установленные и хорошо проверенные научные данные с новыми.

Знание, приобретаемое нами в непосредственном восприятии, обладает аналогичной относительной достовер-

ностью. В этом случае, однако, причины такого заключения достаточно очевидны. Ведь мир настолько обширен и содержит в себе так много неизвестного для нас, что нам и в голову не приходит принимать узнаваемое в непосредственном восприятии за систему абсолютных истин, все выводы из которых следует считать верными в сколь угодно широких рамках любого будущего опыта. Напротив, мы понимаем, что в действительности непосредственное восприятие — это способ поддерживать контакт с определенной областью мира, и притом так, что мы можем быть в курсе общей структуры этой области (на протяжении какого-то отрезка времени), если наш процесс восприятия проходит должным образом. При таком контакте нам бывает достаточно иметь возможность держать объекты в поле нашего зрения, а также, возможно, в некоторых отношениях несколько предварять их движение (например, управляя автомашиной, мы можем — в определенных границах — предвидеть движение других автомашин, пешеходов, догадываться о следующих поворотах дороги и пр.). Итак, в процессе непосредственного восприятия приобретается определенное знание, *выводы* из которого оказываются верными в момент контакта и в течение некоторого периода (непредсказуемой длительности) после него. Основная ценность такого рода знаний о прошлом состоит, следовательно, в *выводах* из них, касающихся настоящего и будущего восприятия, а не в накоплении багажа истин, принимаемых за абсолютные.

Итак, наше знание о том, что было вчера, *само по себе* не так уж важно, потому что вчерашний день прошел и больше не повторится. Но это знание будет все же полезно в той мере, в какой умозаключения и выводы, получаемые из него, могут представлять ценность для нас сегодня или когда-либо в будущем.

Конечно, области применимости научных теорий и выводов из них, очевидно, гораздо шире, чем «гипотез», которые возникают при нашем непосредственном восприятии (для достижения таких расширенных областей необходимо, однако, работать только на очень высоких уровнях абстрагирования). А раз область применимости

теории настолько широка, то для выяснения ее границ нередко требуются длительные сроки. Но тем не менее процесс научного исследования с интересующей нас здесь стороны *в принципе* не отличается от того, что имеет место при непосредственном восприятии. Дело в том, что и для науки мир в целом слишком «велик», чтобы его можно было охватить определенным образом в *какой-либо* одной форме знания—и не только вследствие его буквальной огромности и неизмеримости, но еще более из-за того, что этот мир на всех своих многочисленных уровнях, в своих областях и аспектах содержит неисчерпаемое многообразие структур, ускользающих от любой данной концептуальной «сети», какую мы используем, пытаясь выразить их порядок и характер. Отсюда, как и в области непосредственного восприятия, наше знание является адекватным для первоначальной области нашего контакта с миром и для некоторых дальнейших областей, не поддающихся четкому определению. Так как задача достижения абсолютно верного знания не имеет к этому никакого отношения, то мы вынуждены предположить, что научное исследование должно рассматриваться в основном как способ расширения перцептуального контакта человека с миром и что главная ценность научного *знания* (как и информации, получаемой в непосредственном восприятии) состоит в углублении такого процесса.

Перцептуальный в своей основе характер научного исследования проявляется отчетливее всего, когда настает время *понять* новые факты, а не просто приобщить их к старым знаниям. Любой из нас испытал это в ряде случаев за свою жизнь. Пусть, например, человеку объясняют нечто непривычное (скажем, геометрическую теорему). Сначала этот человек будет в состоянии усвоить лишь отдельные «кусочки» знания, между которыми он не будет ощущать ясной связи. Но на некотором этапе, в весьма быстро протекающем процессе, говоря о котором часто используют такие слова, как «осенило» или «озарило», человек *понимает*, что хотя бы ему объяснить. Когда это происходит, он говорит: «Я понял», имея в виду в основном *перцептуальный* характер

такого процесса<sup>1)</sup>. (Конечно, такое «озарение» относится не к оптическому зрению, а к «внутреннему зрению».) Что же человек при этом «видит»? Он начинает воспринимать новую цельную структуру, в свете которой все прежние крупинки знания встают на свои места и обнаруживают естественную связь друг с другом, причем внезапно обнаруживаются новые многочисленные, прежде не ожидавшиеся взаимосвязи. Позднее, чтобы сохранить такое понимание, передать его другим, применить или проверить его справедливость, человек может перевести его на язык слов, формул, диаграмм и т. д. Первоначально же мы обнаруживаем единый акт, в котором прежние структуры устраниаются и уступают в уме место новым структурам.

Когда возникает потребность в создании новой теории, то принципиально новый шаг, как правило, представляет собой один или несколько следующих друг за другом актов понимания. Перед тем как достигнуть такого понимания, исследователь сталкивается с рядом проблем, к которым приводят прежние теории, когда их применяют к новым областям. В этом процессе мы в конце концов сталкиваемся с противоречиями, недоразумениями и неопределенностями в тех выводах, которые дают старые теории в приложении к новым проблемам. Если при этом исследователь готов отбросить старые представления, его ум может оказаться восприимчивым для обнаружения новых взаимосвязей, в свете которых можно по-новому понять (увидеть) как новые, так и старые факты. На основе этой восприимчивости развивается новое понимание, т. е. выражение старых фактов в терминах новой структуры, получают выводы, уводящие нас за рамки прежней точки зрения.

Конечно, не следует думать, будто все такие акты понимания сразу же ведут к верным теориям. Напротив, оказывается, что многие из них бессильны решить основные стоящие на повестке дня проблемы. Поэтому каждое такое «понимание» нуждается в проверке и вы-

---

<sup>1)</sup> Здесь и ниже в оригинале используется своеобразная игра слов, основанная на том, что по-английски выражение «I see» означает как «я вижу», так и «я понял». — *Прим. перев.*



яснении области его применимости. Для этого необходимо разработать логические следствия из той новой структуры идей, которая возникла в уме наблюдателя. Но как бы важны ни были эти шаги, они тем не менее стоят в зависимости от главного творческого акта понимания, без которого либо остановилось бы в конце концов развитие науки, либо наука закоснела в ограниченной области и никогда не вышла за рамки узкого круга идей.

Способность человеческого ума вырабатывать описанным выше способом новые структуры, по-видимому, ничем не ограничена. Представляется, что именно этой способностью обусловлен наш дар выдвигать новые теории и новые идеи, приводящие к знанию, выходящему за рамки тех фактов, которые были доступны нам во время первоначальной формулировки теорий. Следует напомнить, что эта способность проявляется как в непосредственном восприятии, так и в научном исследовании, так как сплошь и рядом то, что конструируется во «внутреннем видении», приводит (и мы это уже видели выше) ко многим правильным предсказаниям относительно наших будущих восприятий. Очевидно, что такой дар не может быть связан только с каким-то механизмом, беспорядочно «выдающим» разные «гипотезы», пока одна из них не найдет подтверждения. Более того, по еще не известным причинам в общем процессе восприятия (на уровне ли непосредственного восприятия или на более высоком уровне, когда осуществляется понимание) человеческий мозг способен создавать структуры, вероятность которых оказаться справедливыми за рамками той области, для которой они были сформулированы, удивительно велика. На базе такой способности неподходящие структуры могут успешно отсеиваться с помощью «метода проб и ошибок». Одновременно этот процесс дает нам материал, на анализе которого строится новый акт понимания или восприятия, причем выдвигаются все новые структуры, которые, весьма вероятно, будут обладать еще более широкой областью применимости и находиться в лучшем соответствии с фактами, чем прежние структуры.

Подведем итоги. Существен тот факт, что через восприятие мы всегда находимся в состоянии контакта с

миром, причем можем получать информацию об общей структуре той его области, с которой контактируем. Тогда науку можно рассматривать как средство для установления с миром контактов нового рода — в новых областях, на новых уровнях, с помощью разных приборов и т. д. Но все эти контакты значили бы очень мало, если бы не сопровождались актом понимания, который соответствует на чрезвычайно высоком уровне тому процессу, где все, найденное инвариантным, формирует «внутреннее видение» непосредственного восприятия. Поэтому незачем ломать голову над тем, почему наука не ведет к познанию абсолютной истины. Ведь знание, даваемое нам наукой (как и всякое другое знание), — это в основном выражение структуры, выявляющейся в процессе наших непрерывных контактов с миром, который, если взять его в целом, не вмещается в рамки того, что мы способны охватить любыми данными наборами образов, идей, представлений, понятий и т. д. И тем не менее мы способны получить довольно хорошее представление о том, с чем до данного момента бывали в контакте, представление, верное также в некоторой области, более или менее выходящей за рамки, определяемые лишь объектами нашего контакта. Оставаясь готовыми натолкнуться на противоречия и сохраняя способность к открытию новых взаимосвязей, которые и приведут к появлению нового понимания, мы можем продолжать наши контакты с миром и при этом можем некоторым образом предвидеть, что произойдет дальше.

Такой процесс протекает в науке на чрезвычайно высоком уровне абстрагирования и требует времени, исчисляемого годами. В непосредственном восприятии он происходит на низшем уровне абстрагирования и протекает очень быстро. В науке этот процесс сильно зависит от коллективных усилий, и вклад в него принадлежит многим людям, тогда как в непосредственном восприятии этот процесс в значительной мере индивидуален. В основе своей, однако, оба эти процесса могут рассматриваться как предельные случаи единого всеобщего процесса, некоторого обобщенного вида восприятия, при котором мы не встречаемся с каким-либо абсолютным знанием.

## Оглавление

---

Предисловие редактора перевода . . . . .	5
Из предисловия автора . . . . .	9
1. Введение . . . . .	15
2. Доэйнштейновские концепции относительности . . . . .	18
3. Вопрос об относительности законов электродинамики . . . . .	25
4. Опыт Майкельсона—Морли . . . . .	29
5. Попытки спасти гипотезу эфира . . . . .	32
6. Лоренцева теория электрона . . . . .	38
7. Дальнейшее развитие теории Лоренца . . . . .	41
8. Проблема определения одновременности в теории Лоренца . . . . .	47
9. Преобразования Лоренца . . . . .	52
10. Неопределенность, внутренне присущая значениям пространственно-временных измерений в теории Лоренца . . . . .	56
11. Анализ понятий пространства и времени на языке систем отсчета . . . . .	58
12. «Здравый смысл» и понятия пространства и времени . . . . .	65
13. Введение в эйнштейновские представления о пространстве и времени . . . . .	70
14. Эйнштейновский подход к преобразованиям Лоренца . . . . .	81
15. Сложение скоростей . . . . .	87
16. Принцип относительности . . . . .	91
17. Некоторые применения принципа относительности . . . . .	96
18. Импульс и масса в теории относительности . . . . .	103
19. Эквивалентность массы и энергии . . . . .	114
20. Релятивистский закон преобразования энергии и импульса . . . . .	120
21. Заряженные частицы в электромагнитном поле . . . . .	124
22. Экспериментальное подтверждение специальной теории относительности . . . . .	131
23. Еще об эквивалентности массы и энергии . . . . .	136

24. На пороге новой теории элементарных частиц . . . . .	147
25. Опровержение теорий . . . . .	151
26. Диаграммы Минковского и метод коэффициента $k$ . . . . .	161
27. Геометрия событий и пространственно-временной континуум . . . . .	177
28. Проблема причинности и наибольшая скорость распространения сигналов в теории относительности . . . . .	187
29. Собственное время . . . . .	194
30. «Парадокс» близнецов . . . . .	198
31. Реконструкция прошлого как сущность диаграмм Минковского . . . . .	208
Приложение. Физика и восприятие . . . . .	223
§ 1. Введение . . . . .	223
§ 2. Развитие наших обыденных представлений в младенчестве и детстве . . . . .	225
§ 3. Роль инвариантов в восприятии . . . . .	239
§ 4. Аналогия между процессом восприятия и процессом научного исследования мира . . . . .	266
§ 5. Роль восприятия в научном исследовании . . . . .	277

**Д. Бом**  
**СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ**  
**ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

Редактор *Е. И. Майкова*  
Художник *Г. А. Щетинин*  
Художественный редактор *П. Ф. Некунда*  
Технический редактор *Ю. И. Экке*

Сдано в производство 4/VII 1967 г.  
Подписано к печати 6/XII 1967 г.  
Бумага тип. № 1 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>=4,5 бум. л.  
15,12 усл. печ. л.  
Уч.-изд. л. 13,37 Изд. № 2/3751  
Цена 1 р. 14 к. Зак. 785

Темплан изд-ва «Мир» 1967 г., пор. № 64  
**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»**  
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ленинградская типография № 2  
имени Евгении Соколовой  
Главполиграфпрома  
Комитета по печати  
при Совете Министров СССР  
Измайловский проспект, 29

## ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

*Вышли в свет новые книги по физике*

*Дж. Пирс, Символы, сигналы, шумы, Лондон, 1964. Перевод с английского. Стр. 334, цена 1 р. 07 коп.*

Эта книга принадлежит к числу научно-популярных изданий и рассчитана на читателей, имеющих некоторую математическую подготовку и желающих познакомиться с теорией информации.

В живой и остроумной форме автор рассказывает об основных понятиях теории информации и кибернетики и их применениях в физике, технике связи, а также лингвистике, психологии и искусстве.

*Д. Худсон, Статистика для физиков, Женева 1964. Перевод с английского. Стр. 242, цена 94 коп.*

В книге в простой форме изложены те разделы математической статистики и теории вероятностей, которые повседневно применяются при обработке и анализе экспериментальных данных в научно-исследовательской работе.

# ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

*Готовятся к печати*

**Р. Фейнман, Характер физических законов.** Перевод с английского.

В этих лекциях Фейнман продемонстрировал свой большой популяризаторский талант. Привлекая примеры из физики, он говорит о проблеме формирования научных знаний, психологии научного творчества, современной картине физического мира. Фейнман рассказал о том, как были установлены основные законы физики, что они собой представляют, насколько достоверно и чем замечательно то, что мы знаем сегодня, какие законы физики и какие открытия ждут нас в будущем.

**Физики продолжают шутить.** Сборник переводов. Перевод с английского.

Этот сборник показывает, что такой науке, как физика, присущи юмор и шутки.

В книге собраны пародии на научные работы, стихи и карикатуры, рассказы о забавных случаях и событиях в мире физики.