

Физика

Теория относительности

Материя

Пространство

Время

99

Дар
СУВОРОВА С.Г.
Заместителя
главного редактора журнала
«Успехи физики»

ПОПУЛЯРНО-НАУЧНАЯ БИБ.

ФЕЛИКС АУЭРБАХ

53
A93

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

МАТЕРИЯ И ЭНЕРГИЯ

Элементарное введение в теорию относительности

Перевод с немецкого с дополнениями
С. И. Вавилова

НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
МИФИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА

Всего - 1 экз
ФРК - 1 экз.

Гиз. № 3020.

1922 г.

Тир. 4.100 экз.

1-я тип. Главн. Упр. Госуд. Издат. Петроград, Б. Болотная, 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА.

Теория относительности занимает своеобразное положение в современной физике. С формальной стороны она является чисто математической обработкой нескольких опытных фактов и в этом отношении по своей структуре, похожа на термодинамику. Исходя из эмпирических фактов, теория чисто логическим путем приходит к новым, очень важным опытным следствиям. Своеобразное положение принципа относительности заключается в том, что сама математическая техника и символика, на пути от исходных фактов к выводам, получила неожиданную интерпретацию в терминах четырехмерной геометрии. Именно эта символика и математическая техника и привлекает напряженное внимание самых широких кругов, интересующихся наукой о природе; исходные факты и опытные следствия интересны главным образом специалистам физикам и астрономам. Интерпретация физических явлений в символах измененных понятий о времени и пространстве по существу, конечно, чисто математическая, и с этой стороны, может быть, преждевременно говорить о революции философских понятий пространства и времени. Между тем

общее любопытство обращено именно на эту сторону дела. Популярное изложение, *volens volens*, должно учитывать желание читателя, но математическая символика почти не поддается популяризации—в этом неизбежная Ахиллесова пята всех бесчисленных „общедоступных“ книг по теории относительности. По существу физик должен крайне неохотно соглашаться на популяризацию такого рода. Ведению широких кругов подлежат только исходные факты и опытные следствия, промежуточная же работа во всякой теории случайна, временна, многообразна и, в каких бы заманчивых символах она ни производилась, имеет значение только для „спецов“.

Мы обращаем поэтому внимание читателя предлагаемой книги прежде всего на экспериментальную сторону дела.

Феликс Ауэрбах—автор многочисленных очень хороших популярных книг по физике. Настоящая книга обладает обычными достоинствами произведений этого автора—наглядностью, простотой и увлекательностью изложения. Вместе с тем она, к сожалению, не лишена тех недостатков, которые совершенно неизбежны при популярном изложении теории относительности. Книга предназначена автором для очень широкого круга читателей, начиная с сельских учителей. В русском масштабе этот круг должен, конечно, сузиться. Для понимания книги нужны во всяком случае элементарные сведения из физики и математики. Изложение книги неровное: первая часть очень элементарна и доступна многим, вторая написана слишком сжато и безусловно

требует предварительных (хотя и очень небольших) знаний.

Наш перевод не везде является дословным. Во многих местах мы сочли полезным вводить сокращения или дополнения, пытаюсь избежать слишком упрощенных схем и преувеличений. В конце книги добавлены примечания, главным образом, критического характера: они предназначены для сравнительно подготовленного читателя.

На русском языке существует очень большое число популярных книг и статей в популярных физических журналах („Вопросы физики“, „Физическое Обозрение“ и т. д.) по теории относительности, особенно о специальной теории. Читателям, желающим ближе познакомиться с теорией, рекомендуем следующие книги:

1) А. Эйнштейн, „О специальной и общей теории относительности“ (общедоступное изложение). 1921, 1922 г. (книга имеется в нескольких изданиях и переводах);

2) Г. Минковский, „Пространство и время“ (Петроград, 1911, изд. Physice);

3) Э. Фрейдлих, „Теория относительности“, (Москва, 1922 г. Гос. Издательство).

Критике теории относительности посвящена вышедшая в русском переводе в серии „Популярно-научной библиотеки“ брошюра: Ленар,— „О принципе относительности, эфире и тяготении“.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ.

Механические явления.

1. Введение.

Лет десять тому назад издатель одного известного еженедельника обратился ко мне с предложением написать статью о теории относительности. Мой ответ я начал приблизительно такими словами: „Спрыгивать с поезда на ходу воспрещается“. Такое объявление, очевидно, снимает с правления дороги ответственность за те несчастия, которые могут произойти с выпрыгивающим, а также с лицами, стоящими на перроне. В те времена теория относительности была еще на полном ходу, и популяризация ее легко могла принести вред как науке, так и профанам. Такой вред в высокой степени действительно обнаружился по крайней мере в отношении последней категории лиц; образовались и частью даже укрепились самые фантастические представления. Теперь положение дел изменилось; если поезд еще и не дошел до цели, то во всяком случае большая часть пути пройдена, внимание же публики не уменьшилось, а скорее возросло. По

себе по крайней мере знаю, что всюду, в гостинице, в вагоне и даже на улице, приходится слышать один и тот же вопрос, иногда робкий и подготовленный, иногда неожиданный, как выстрел из пистолета: „Неправда ли, вы—физик? У меня к вам большая просьба!“ Не дожидаясь окончания, я прерываю. „Знаю, знаю—вам хочется понять теорию относительности“. Иногда я малодушествовал и соглашался, но, убедившись, насколько превратно воспринимаются все объяснения, я стал непреклонным и ограничиваюсь следующими заявлениями. „Во-первых,—говорю я,—вы все-таки не поймете сути дела; во-вторых, если бы вы наполовину и поняли, вы не станете счастливее и, в-третьих, никогда и нигде в жизни Вы не почувствуете надобности в этой теории“. Практически настроенные любопытствующие начинают дышать свободнее после такой отповеди, неудовлетворенными остаются только интересующиеся „миросозерцанием“.

Понятие „профан“ очень растяжимо. Среди профанов есть люди, по своему призванию далекие от всякого научного мышления; есть и другие, занимающиеся науками, но не естественными, а гуманитарными, в которых приходится оперировать другими воззрениями и методами. Хотя в конце концов и наша задача вполне совпадает с задачами гуманитарных наук, она все же коренится в мире воззрений и идей естествознания, а в эту область философ частью из-за незнакомства с местностью, частью из высокомерия, вступает нелегко и неохотно. Несколько лет тому назад со мной, например, произошло следующее: я, единственный естествовик, находился в обще-

стве нескольких философов; разговор, конечно, зашел о молодой еще в то время теории относительности; один из собеседников заметил: „для вас, физиков, все это может быть ново и неожиданно, мы же, философы, знаем это очень давно“. Когда я его немножко расспросил, выяснилось, что он не имел ни малейшего представления о сущности и смысле основных пунктов теории. Даже большинство естествоиспытателей, особенно биологов, в широком смысле слова, нужно рассматривать как профанов; им недостает главного—геометрических представлений и математического мышления.

После всех этих замечаний читатель вполне естественно может спросить: „почему же однако при таких взглядах ты с нами разговариваешь? Замолчи и предоставь беседовать с нами другим, лучше думающим о нас“. Откровенно говоря, мне кажется, что я о вас очень хорошего мнения и потому рта не закрою, однако и не намерен выкрикивать вам всякий вздор, от которого у вас пошел бы туман в голове. Я расскажу вам, что могу, медленно и спокойно, обо многом умолчу и попрошу вас мне поверить в тех местах, где вы не в состоянии понять непосредственно. Несмотря на все это, я надеюсь, что вы по прочтении книги скажете: „теперь я понимаю, в чем дело“.

2. Почему всякое открытие возбуждает любопытство, а теория относительности особенно.

Среди бесчисленных событий в истории духовной жизни человечества особенно выдаются те, которые „возбуждают любопытство“ в широких кругах. Иногда это любопытство—ложное, иногда—настоящее. Первое характеризуется быстрым истощением, при чем самый предмет любопытства предается забвению. Нетрудно привести примеры из нашего времени. Теория относительности не принадлежит к сенсациям такого рода—она не будет забыта. Она станет тем прочным достоянием науки, которое будут считать самоочевидным и кончат тем, что начнут удивляться своей вековой слепоте. Это также признак истинного открытия.

Каковы же поводы появления интереса к какому-либо открытию? Существенных поводов—три. Во-первых (начиная, так сказать, с конца), влияние открытия на технику, на изобретения. Это может произойти непосредственно, как в телефоне Беллы, или очень медленно и постепенно, как, например, случилось с маленькой искоркой, которая дала Герцу возможность открыть электрические волны в пространстве; открытие выросло затем в беспроводную телеграфию, покорившую весь земной шар. В теории относительности, однако, о технике не может быть речи; очевидно, что в ближайшее время она не послужит основой никаких изобретений; более того, по крайней мере теперь, кажется весьма сомнительным, чтобы теория относительности вообще

могла вторгнуться в практическую жизнь человечества.

Во-вторых, открытие вызывает к себе внимание, если в нем есть что-то новое в глазах человека, при чем, конечно, предполагается, что это новое действительно интересно. Телескоп обнаружил нам фазы Венеры и кольца Сатурна; Рентгеновские лучи дали возможность заглянуть внутрь человеческого тела. Теория относительности в свою очередь подвела нас вплотную к явлениям, которых мы ранее не знали или не понимали. Но все эти явления такого рода, что их можно наблюдать только в самых сокровенных недрах лаборатории или же с помощью самых утонченных методов астрономии—для массы эти явления проходят незаметными.

Остается последнее основание всеобщего интереса: переворот в нашем мировоззрении, вызываемый открытием. Мировоззрение может быть религиозным или философским; прежде в нем сильнее был первый элемент, теперь наоборот. Теория Коперника о вращении земли вокруг солнца вызвала понятную бурю в то время, когда все человечество строило свое мировоззрение на Библии, и церковь должна была вмешаться, иначе, как ей казалось, ее зданию грозило крушение. Впрочем церковь взволновалась без нужды; система Коперника не принесла ей ни малейшего вреда и позднее была ею санкционирована. Также обстояло дело с дарвинизмом, который начал подкапываться под самое священное—под идею сотворения мира и человека; и в этом случае церковь стала центром противников, и также со временем наступило успокоение; цер-

ковная наука одобрила многое из учения Дарвина, то же, что она отвергла, оказалось неприемлемым и без того. Обо всем этом не может быть речи в случае нашей теории. Ее основное положение заключается в том, что мы не можем понять ничего абсолютного, нам доступно только относительное—утверждение, приятное религиозному сознанию. Если далее наша теория рушит старое представление о пространстве и времени и строит их на новом широком основании, то в Библии и других церковных книгах нет противоречащих утверждений. Таким образом можно говорить только о философском перевороте, о новой интерпретации основных натурфилософских представлений о пространстве и времени, материи и энергии. До сих пор физик заимствовал эти основные представления, особенно о пространстве и времени из философии, он правомерно принимал их такими, какими они были предоставлены в его распоряжение философом Кантом. Для естествоиспытателя, конечно, это был только кусок материи, отсутствовала выкройка; точнее говоря, философ предоставил физику выработать единицы и производить точные измерения. Физика исполнила свою задачу самым добросовестным и аккуратным образом. Но результат был самый неожиданный: физическое измерение привело философские понятия к абсурду, т.-е. к неразрешимым внутренним противоречиям. Современному физику не остается ничего иного, как взять разработку понятий в свои руки. Коротко говоря, физик, до сих пор нанимавший квартиру у философа, вынужден строить себе собственный дом.

3. Смысл теории относительности.

Что же такое теория относительности и чего она хочет? По самому смыслу названия мы можем заранее сказать: в теории содержится утверждение о том, что все познаваемое нами относительно, абсолютное познание для нас невозможно. Это утверждение простирается прежде всего на пространство и время и далее на все, что в них находится и происходит, т.-е. на движение, материю, энергию и т. д. Сразу же обнаруживается пропасть между философией и физикой. Философ руками и ногами начинает сопротивляться такому явному и существенному ограничению его царства. Сердцу физика не так дороги размеры его владения, как прочность обладания; он отказывается управлять теми областями, где он не в состоянии поддерживать порядка. Физик, следовательно, ограничивает себя, и в этом смысле наша теория—теория ограничения и отказа. Это, конечно, отступление, которое в некоторых обстоятельствах и похвально, но всегда оставляет осадок неудовольствия. Впрочем дело не так уж печально, как кажется сначала. Физик, как мы сказали, устал от роли квартиронанимателя в отношении к философии, он хочет независимости и в основах он хочет создать свое собственное пространство и время. К этому он вынужден, так как видит, что заимствованные понятия ведут к противоречию с опытом; опыт же его единственный бог. Он не закрывает глаза на мир и не пытается одним размышлением построить свое пространство и время; наоборот, он смотрит ясными гла-

зами. Если сам он теоретик, он понуждает своего коллегу-экспериментатора поставить возможно больше опытов и просит сообщить ему результаты; на основании этих результатов он устанавливает, что такое пространство и время и каковы их свойства. Он не покупает готового пиджака, висящего на нем как на вешалке, а кроит себе сам, чувствуя удовлетворение от хорошей выкройки. На первый раз может быть его постигнет и неудача—ведь он неопытный портной; но второй и третий раз дело пойдет лучше. Физика сшила себе уже три таких костюма—классический, современный и совсем новый (о самом модном костюме, ставшем только что известным, мы здесь умолчим) и теперь она в этом отношении у цели своих желаний.

Таким образом мы имеем два совершенно новых понятия: физическое пространство и физическое время, или, как еще можно выразиться, объективные пространство и время, в противоположность субъективным понятиям философа. В этом смысле новая теория является теорией объективирования пространства и времени. Это название имеет преимущества во многих отношениях, так как высказывает нечто положительное: оно указывает на шаг вперед, на включение основных понятий в сеть фактов. До сих пор создавалось странное положение; физик определял на основании опыта упругость, электричество, свет, звук и все прочее и только оба основных понятия пространства и времени принимал на веру. Теперь это должно прекратиться, и тем самым физика становится завершенной и самостоятельной наукой. Простран-

ство и время перестали быть фантомами, они такие же свойства вещей, как цвета и электрические заряды. Итак, перед нами теория объективирования пространства и времени.

Но всякую вещь можно рассматривать с различных и даже (за исключением луны) противоположных сторон; так же обстоит дело и в нашей проблеме. Объективированию противостоит субъективирование — в том смысле, что мы снова должны научиться смотреть наивно, непредубежденно. В этом отношении мы сильно изуродованы, мы ничего не можем видеть так, как видим непосредственно, мы изменяем и дополняем видимое нами в соответствии с нашими мыслями, воспоминаниями или ранее виденным. Мы смотрим не телесными, а духовными очами, фальсифицируем цвета и точно так же фальсифицируем пространство. Что мы видим? Очевидно, поверхность, т.-е. нечто двухмерное, плоскую картину, появившуюся на сетчатке глаза в результате химических процессов и проектированную во вне. Но мы знаем, что эта картина несколько изменяется при закрывании одного из глаз, что она резко меняется при нашем перемещении. На основании этого мы строим телесное трехмерное пространство, сначала перспективное и затем далее объективное, геометрическое, в котором все соотношения повсюду одинаковы, и, независимо от нашей точки зрения, одинаковы по длине, высоте и ширине. Нас поддерживает в этом построении чувство осязания, которое приводит другим путем к тем же результатам. К тем же, но все-таки несколько различным: пространства зрения и осязания ока-

зываются не совершенно тождественными. При этом возникают многие интересные вопросы, например, о форме небесного свода, вопрос в настоящее время снова оживленно дебатированный, но здесь не место на этом останавливаться.

4. Понятие пространства. Интерпретация Канта. Пространства различных измерений и различной кривизны.

Остановимся на образовании понятия пространства в истории культуры. Самое наивное и старое, но все же испытывавшее на себе бессознательную работу мышления, представление о пространстве, как о сосуде, в котором находятся и движутся вещи — представление объективное. Затем произошел великий переворот, неслыханное дело великого Эммануила Канта, отнявшего у пространства все реальное и объявившего пространство формой, в которой мы воспринимаем мир. Для нас не существует внепространственных вещей в себе, они доступны нам лишь в той форме, в которой мы их воспринимаем. Эта теория расширяется привнесением в нее времени, как внутренней формы нашего восприятия, но об этом речь будет дальше. Итак, в определенный момент мы познаем вещи по их пространственной форме. Естественное возражение о том, что вещи дают знать о себе и иным способом, свечением и цветом, давлением и запахом и т. д., заставляет, конечно, призадуматься, но и на этом пока мы останавливаться не будем. Весьма существен-

ным в теории Канта является добавление о том, что эта форма внешнего восприятия, т.-е. пространство, есть форма прирожденная, которую мы должны принимать такой, как она есть, и не в состоянии добавить что-нибудь новое. Физики охотно соглашались с этой интерпретацией понятия пространства Канта; она была для них очень удобна. Скоро, однако, выяснилось, что добавление о прирожденности и тем самым о единственности представления пространства является слишком стеснительным. Поэтому по инициативе великого естествоиспытателя и натурфилософа Гельмгольца от этого ограничения отказались, считая пространство формой нашего познания, приобретаемой опытом. Но если понятие пространства приобретается опытом, то хотя бы последний был многообразным и тысячетлетним—новый опыт в состоянии его изменить и даже совершенно разрушить. Более того, можно показать, что это пространство опыта является только одним из многих возможных и мыслимых пространств, о которых мышление позволяет выработать определенные представления.

Для последовательного и возможно наглядного усвоения такого мыслительного процесса представим себе мир простейшего пространственного множества, т.-е. линию и на ней мыслящие существа—точки. Эти существа ничего не знают, кроме своего линейного мира, из любого пункта этого мира можно двигаться только вправо или влево. Для нас, живущих в ином мире, существует бесчисленное множество таких линейных миров—линейный, круговой, яйцевидный и т. д. Разумеется, точечные существа не

имеют никакого понятия об отличии прямой и кривой линии—им известна „линия“ вообще, которую они считают „прямой“, независимо от того, является ли она с нашей точки зрения прямой или кривой. Им не придет в голову, что от одной точки к другой можно двигаться различными путями.—для них существует только один путь. Однако между прямолинейным и круговым миром существует одно замечательное различие: двигаясь постоянно вперед в прямолинейном мире, никогда нельзя вернуться к себе на родину, как это бывает в круговом мире. Прямолинейный мир — бесконечен, круговой конечен, но безграничен, он замкнут сам в себе. Другое существенное различие можно указать между прямолинейным и круговым мирами, с одной стороны, и яйцевидным, с другой. Если два точечных существа движутся по их миру с одинаковой скоростью, они остаются, по их мнению, всегда на одном и том же расстоянии, и это одинаково относится ко всем трем мирам. Для нас, однако, это справедливо только в отношении двух первых миров, так как в этих случаях расстояние между обоими существами будет всегда одинаково, будем ли мы мерить его по дуге (как это делают линейные существа), или по хорде (рис. 1). Наоборот, заключение точечных существ о равенстве расстояний в случае яйцевидного линейного мира будет для нас, высоко-организованных существ, справедливо только в том случае, когда мы расстояние будем мерить по дуге, в случае же измерения по хорде равенство нарушится: для равных дуг хорды в тупой и острой части яйцевидной линии

будут неравными. Таким образом самый интересный результат странствия по яйцевидному миру недоступен для точечных существ.

Сделаем шаг дальше, перейдем к миру поверхностей и к двумерным существам — теням. Эти тени, конечно, по-прежнему считают свой

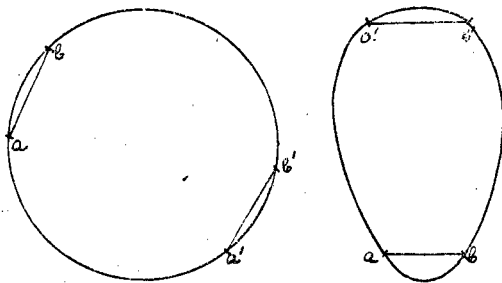


Рис. 1.

мир за единственно возможный, мы же знаем, что это или плоскость, или шар, или яйцо, или иная поверхность, и на каждой из них имеют силу свои законы. На плоскости находит свое приложение знаменитая аксиома о том, что параллельные линии никогда не пересекаются; на шаре же две линии, направленные, например, из экватора в одном и том же направлении на север, пересекутся в точке северного полюса. На шаре существует и противоположный случай непересекающихся параллельных линий, самым простым примером чего служат параллельные круги, огибающие землю. На плоскости, далее, справед-

лива аксиома о том, что между двумя точками существует одно кратчайшее расстояние — прямая линия, но на шаре таких кратчайших расстояний — бесконечное множество, например, между полюсами все меридианы — кратчайшие расстояния. На плоскости сумма углов треугольника всегда равна двум прямым углам, на шаровой поверхности эта сумма может достигать четырех прямых углов; в случае треугольника, образованного пересечением двух перпендикулярных друг к другу меридианов и экватором, сумма углов равна, например, трем прямым. Наконец, и в этом случае сохраняется противоположение: плоскость — бесконечна, шаровая поверхность — конечна, но все же безгранична.

При всем различии плоский и сферический мир имеют нечто общее: кривизна повсюду одинакова, и тем меньше, чем больше шар; в случае плоскости (бесконечно большого шара) кривизна повсюду равна нулю. Из постоянства кривизны следует, что линии и фигуры при передвижении по поверхности остаются совершенно подобными. Однако на яйцевидной поверхности кривизна в различных местах различна, на острие она — наибольшая, в тупом конце — наименьшая; поэтому какая-нибудь фигура, напр., треугольник, будет претерпевать с нашей, более широкой точки зрения странные изменения при перемещении по яйцевидной поверхности. Итог: существуют различные двумерные миры, но для того, чтобы постигнуть различие законов этих миров, нужно или стоять на более высокой — трехмерной точке зрения или же, будучи двумерным существом, живущим в одном из этих миров, надо быть

столь развитым, чтобы суметь мыслью подняться за пределы своего мира, заставить мысль работать там, где бессильно непосредственное наблюдение.

Теперь подыдемся к трехмерному, т.-е. к нашему миру. До сих пор мы были умниками — теперь становимся глупцами. Мы считаем наш мир за единственно возможный. Мы говорим: есть различные двухмерные миры, но трехмерный только один — наш. Если мы прячемся с таким утверждением за Канта, то еще вопрос, согласился ли бы он на это. Во всяком случае представим себе мысленно четырехмерное существо, и мы поймем, как станет оно над нами смеяться. Тот, однако, кому не нравится быть осмеянным, должен несколько напрячь свой ум и сказать себе, «Совершенно так же, как существует плоскость, шар и яйцевидная поверхность, существует „плоское пространство“, „шаровое пространство“, „яйцевидное пространство“ и т. д. Я не могу, конечно, представить себе наглядно эти пространства, наглядно для меня только одно пространство, не принадлежащее ко всем этим категориям, — „пространство просто“; возможно, однако, логическое представление. Очевидно, что не все логически понятное может быть представлено наглядно. Впрочем возможно хотя бы до некоторой степени получить наглядные представления о соотношениях в сферическом пространстве, рассматривая, например, свое собственное отражение в тех стеклянных высеребряных шарах, которые ставятся на садовых клумбах. Но те же представления можно получить и размышлением; в зависимости от того, плоское или сферическое

наше пространство, в нем будут различные законы. То, что в одном случае является прямой линией, будет кривою в другом, бесконечное в одном — замыкается в другом и т. д. На основании всего того, о чем нас учит астрономия и оптика, и на чем мы здесь не будем останавливаться, мы имеем полное основание предполагать наше пространство приблизительно, но не совершенно, „плоским“, оно обладает необычайно малой, но все же заметной для тонких методов наблюдения и при колоссальных расстояниях, кривизной.

Таким образом пространство становится предметом естественно-научного исследования, оно перестает быть подарком свыше, притом подарком Данайцев — его хотят заслужить. Исследование подвергается все происходящее в пространстве. Естественный исследователь изучает земные и небесные движения, оптические и электрические явления — возникает необъятное поприще для работы.

5. Понятие времени. Четырехмерный мир.

Время по Канту — также форма нашего восприятия, но не внешнего, а внутреннего характера. Можно лишиться зрения, слуха, осязания и пр. и тем не менее чувствовать течение времени. Конечно, на таком ощущении времени нельзя построить точных измерений. Человеку кажется иногда, что время еле ползет, иногда

оно „летит“. При таком положении дел естествоиспытателю остается только перейти от своих внутренних ощущений к внешнему миру и связать время с пространством. Всем известно, что это достигается в явлении движения. Движение — изменение места в пространстве со временем, при чем существуют прямолинейные, криволинейные, равномерные и неравномерные движения. Для получения меры времени, подобной сантиметру в пространстве, нужно выбрать такое движение, относительно которого существует уверенность, что оно протекает всегда одинаково. Таким движением является, напр., вращение земли вокруг своей оси. Отсюда получается единица времени — день и более мелкие, но употребительные секунды. Таким образом сантиметр и секунда становятся единицами времени и пространства.

Различаются ли, однако, оба эти понятия по существу? Самый процесс получения единицы времени из рассмотрения пространственного движения должен нас настроить в этом отношении скептически. Чтобы понять сущность дела, мы снова воспользуемся тем методом заключения по аналогии, который мы с успехом применили при рассмотрении одно-, двух- и трехмерного мира.

Представим себе двухмерную тень, одаренную нашим человеческим разумом, в плоском двухмерном мире. Пусть этот плоский мир равномерно движется в нашем трехмерном пространстве (рис. 2а, на рисунке эта плоскость предполагается перпендикулярной к плоскости чертежа и оставляет прямолинейный след).

обитатели плоскости и не подозревают о таком движении: для них мир существует только на их плоскости. Пусть теперь эта плоскость при своем продвижении понашему трехмерному миру наталкивается на прямую линию, поставленную перпендикулярно к этой плоскости. В некоторое мгновение обитатели плоского мира заметят появление какой-то новой точки, ранее не существовавшей в их мире; эта точка останется некоторое время на своем месте, а затем снова таинственно исчезнет. Теневые существа будут утверждать, что в их мире в течение некоторого времени (напр., одной секунды) существовала какая-то точка. Мы же, трехмерные, скажем: предмет остался

на своем месте, притом это не точка, а прямая линия. Тени говорят о промежутке времени, мы об отрезке в пространстве. Может быть, еще отчетливее эта разница в интерпретации станет в том случае, если прямая будет наклонна к движению плоскости (рис. 2б). Тени замечают вдруг, что в их мире возникла новая точка, они видят, как эта точка начинает дви-

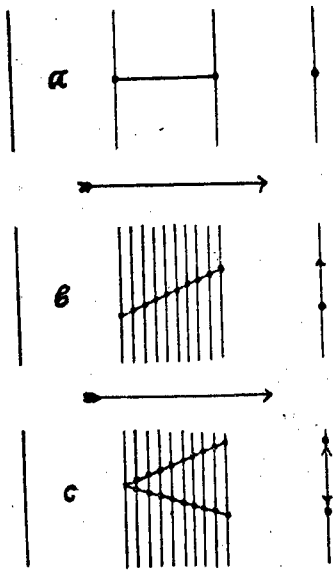


Рис. 2.

гаться в их мире, занимает различные положения и потом исчезает. То, что для нас является прямолинейным наклонным отрезком—совокупностью точек, для них, теней, существует как движение, временное чередование точек. Или рассмотрим третий случай треугольника на пути движения плоского мира (рис. 2 с). Тени увидят сначала одну точку, затем она раздвоится, и расстояние между двумя точками начнет все увеличиваться. Для нас это—„увеличение расстояния в пространстве“, для них—„возрастание расстояния со временем“.

Теперь по аналогии сделаем надлежащее заключение о нас самих по отношению к высшему существу четырехмерного мира. Мы также говорим о появлении вещей, их движении и росте. Четырехмерное же существо во всех этих случаях видит только пространственное одновременное расположение предметов и сожалеет о нас, не постигающих этого пространственного многообразия четырехмерного мира. Итак, для четырехмерных существ наше время—четвертая размерность их мира. Мы же не имеем представления о такой размерности.

Наш трехмерный мир странствует в высшем четырехмерном мире и получающиеся при этом пространственные многообразия мы называем событиями во времени. Время и пространство родственны по существу, являясь четырьмя многообразиями мира.

Если бы мы попытались изобразить этот четырехмерный мир, мы потерпели бы неудачу в силу ограниченности нашего воображения. Трехмерный мир может быть определен, как известно,

так называемыми координатами. Для этой цели мы выбираем какую-нибудь точку пространства, как нулевую, и через нее проводим три взаимно перпендикулярные прямые, так называемые координаты, ось X вправо и влево, ось Y вперед и назад, ось Z —вверх и вниз. На бумаге все это можно представить только перспективно (рис. 3),

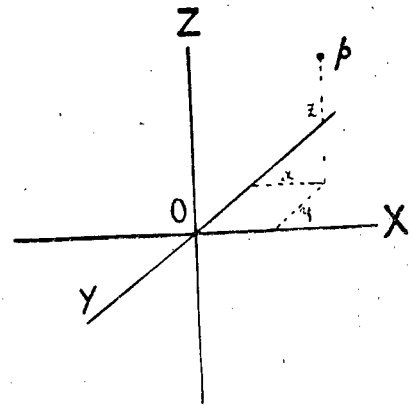


Рис. 3.

при чем если плоскость чертежа совпадает с плоскостью XZ , то ось Y изобразится в перспективном сокращении. Любая точка пространства определится в этой „системе отсчета“ своими координатами x, y, z , т.е. она будет, напр., лежать на x сантиметров вправо, на y сантиметров назад и на z сантиметров выше нулевой точки. В другой системе отсчета координаты будут иные, место—понятие относительное, вполне за-

висящее от выбора системы отсчета. Легко, однако, видеть, что расстояние между двумя точками остается тем же, какой бы системой мы ни заменяли нашу первоначальную систему отсчета: расстояние, или вообще линейный отрезок, не зависит от системы координат, он остается, как говорят, при переходе от одной к любой другой мыслимой системе инвариантом, неизменным.

Так обстоит дело в трехмерном мире. Теперь, однако, нам надлежит провести еще четвертую ось, ось времен T ; но куда же должен я ее вести, когда все направления уже заняты? Действительно, в мире наглядного это неосуществимо. Я должен обратиться к абстрактному мышлению для чисто мысленного решения задачи; после некоторого упражнения это хорошо удается. Есть, однако, и другой способ, далеко не столь общий, как первый; мы, однако, им воспользуемся, ибо для наших целей он достаточен. Нас интересует соединение времени и пространства в одну систему. Но для этого нам вовсе не требуется сразу общий случай трехмерного пространства, пока достаточно двухмерного и даже одномерного многообразия, в этих случаях мы можем обойтись тремя и даже двумя осями, а, следовательно, изобразить все на бумаге совершенно точно. Для простоты разберем случай одномерного мира (рис. 4). Из нулевой точки мы проводим две взаимно перпендикулярные оси X и T . Какая-нибудь точка на плоскости, напр., p , на самом деле не является точкой плоскости, так как существует только одна линия, p изображает точку P линейного мира, но в определенный мо-

мент t ; x и t — временно-пространственные координаты. Различные точки линейного мира в одно-

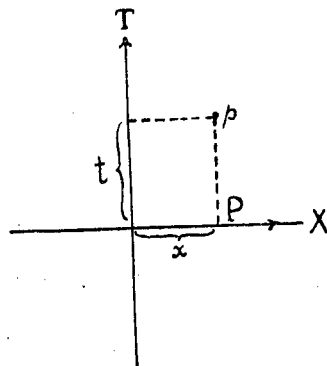


Рис. 4.

и то же время все лежат на какой-либо горизонтальной прямой, те же самые точки в различные времена находятся всегда на одной и той же вертикальной прямой. Рассмотрим, наконец, две любые точки в различные времена, напр., p и p' (рис. 5) и соединим их прямой линией; эта прямая в действительности соответствует движению по линейному миру оси X от точки P к P' и притом таким образом, что P соответствует положению в момент t , P' в момент t' . На практике существуют обширные применения такого метода графического изображения; для нас, однако, сейчас существенно наглядное изображение равноправности пространства и времени.

Существует, впрочем, затруднение, из которого необходимо найти выход, чтобы не испортить дела с самого начала. На пространственной оси мы измеряем отрезки в сантиметрах, а на оси

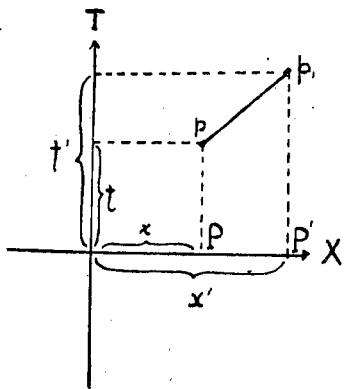


Рис. 5.

времен—в секундах, т.-е. совершенно различными мерами, между которыми нет никакой связи. В таком положении дело оставаться не может, иначе оно поведет к величайшим недоразумениям, подобно существованию двух независимых монетных единиц в государстве. В наше время, когда каждый хоть что-нибудь знает о „валюте“, нет надобности распространяться на эту тему. Мы должны привести время и пространство к ясному и твердому соотношению валюты. Пытаясь, однако, это осуществить, мы видим, что дело как будто безнадежно. Если бы попробовали мерить в сантиметрах не только отрезки, но и

времени, то нужно бы исходить из связи отрезка со временем, т.-е. из скорости движения. Но какая же скорость должна быть нами избрана? Каждая точка в нашем мире может иметь различные скорости. Если бы тени плоского мира, о которых мы говорили раньше, были столь развиты в умственном отношении, что могли бы создать пространственную теорию времени, т.-е. сумели бы разглядеть в последовательном чередовании точек, наблюдаемых ими при пересечении плоского мира с наклонной прямой, пространственную совокупность точек, все же переводный множитель при переходе от времени к пространству остался бы для них непостижимым. Движение их плоского мира в трехмерном пространстве им неизвестно, но именно от скорости движения зависит связь временной координаты с пространством. Даже наша помощь, помощь существ высшего мира, не привела бы к цели: искомый переводный множитель зависит от скорости движения плоского мира и степени наклона прямой. Мы не можем, таким образом, притти к общему, годному для всех случаев правилу перевода. Решение задачи удастся лишь в том случае, если мы отыщем скорость, имеющую универсальное значение для всего происходящего в нашем мире, если мы укажем такое движение, которое происходит с одинаковою скоростью при различных условиях; эта скорость притом должна служить универсальной мерой в целом мире. В мире материи такого движения, такой скорости нет, и поэтому теория относительности в смысле объединения пространства и времени неосуществима механическим

путем. В более тонком „эфирном“ мире такая скорость, однако, существует, это — скорость света. Именно эта скорость дает твердую опору и общее значение нашей теории. Позднее мы увидим, как следует это понимать.

6. Системы мира Птолемея и Коперника.

Наши последние замечания слишком забегают вперед, мы должны поэтому снова вернуться к тому пункту, на котором остановились в изложении нашей задачи в ее простейшей форме. Исторически это тот пункт, который совпадает с возрождением естествознания и великим культурным переворотом, связанным с блестящими именами Коперника, Галилея и Ньютона.

Начнем с Коперника. До него в течение полуторы тысячи лет царилась всюду и бесспорно Птолемеяева система мира. В этой системе земля—центр мира, вокруг нее вращаются по порядку луна, Меркурий, Венера, солнце, внешние планеты, наконец, все множество „неподвижных“ звезд. При этом движение луны и солнца почти равномерное и происходит всегда по одному и тому же, нам хорошо известному направлению. Остальные же планеты иногда меняют направление своего движения, описывают петлеобразные пути и затем снова движутся по нормальной орбите. Такое движение можно было, хотя и искусственно, но в точном согласии с наблюдениями, объяснить так, что планеты в течение их года совершали не только полный оборот вокруг земли, но кроме того в течение земного

года описывали окружность меньшего радиуса вокруг некоторой точки. Это движение подобно вращению маленького колеса по ободу большого. При таком движении по временам действительно возникают наблюдаемые петли, причем у ближних планет один-два раза за время всего обращения, у внешних же—значительно чаще. Маленькие круги называются эпициклами, вся же траектория эпициклоидой.

Коперник посмотрел на дело с противоположной точки зрения: планеты не вращаются вокруг земли, находящейся в покое, наоборот, земля за день совершает оборот вокруг своей оси и кроме того за год совершает полный оборот вокруг покоящегося солнца. Такая интерпретация не вносит разницы в наблюдаемые относительные движения земли и солнца, и при таком воззрении с земли должны наблюдаться заход и восход солнца; но вместе с тем мы получили возможность новой, космической точки зрения, и посмотрим на движения планет уже не с земли, а с солнца. Луна по-прежнему вращается вокруг земли, но не с тем темпом, с которым она пробегает по небу для земного наблюдателя. Планеты—с солнца—кажутся равномерно вращающимися по кругам, для земного же наблюдателя, вследствие собственного вращения земли вокруг солнца, будут возникать вышеуказанные петли.

Какая же разница между этими двумя системами мира? Очевидно, двойная. Во-первых, система Коперника проще, в ней нет эпициклоид, существуют только круги. Задача естествознания—описывать явления природы при

возможной полноте с возможной простотой. В этом преимущество коперниковской системы. Во-вторых, теория Коперника более объективна и менее претенциозна. В системе Птолемея предполагалось само собой разумеющимся, что человек—венец творения, а следовательно его местопребывание, земля—центр вселенной. Земля величественно царит в центре вселенной, все остальное вращается вокруг нее; земля—повелительница. Человек тех времен был далек от мысли, что звезды сами по себе—небесные тела, притом часто значительно больших размеров, чем земля; для них было бы тяжелой задачей носиться с такою быстротой вокруг земли. В основе старого воззрения лежала вера, основанная на Библии; новое учение ей противоречило, и потому еще через сто лет после Коперника выдающийся защитник его учения Галилей должен был отречься от него, хотя бы и формально.

Было бы, однако, совершенно несправедливо, как это сотни раз делалось в книгах и на словах, различать системы Птолемея и Коперника по тому признаку, что первая из них ложная, а вторая—истинная.

Обе системы верны, поскольку они точно описывают наблюдаемые явления, но каждая из них имеет смысл только относительный, не высказывая ничего абсолютного.

Земля и солнце движутся друг относительно друга, и от выбора той или иной точки зрения зависит интерпретация движения. Древность и средневековые стояли на наивной, земной точке зрения, правильное говоря, они были и мысленно

там, где существовали физически. Со времен Коперника нашей мысленной резиденцией, стало солнце, и оттуда мы видим вращение земли вокруг ее оси и вокруг солнца. Система Коперника является первой попыткой установления относительности нашего представления о явлениях мира. Коперник лишил землю ее преимущественного положения, выбор же солнца в качестве центра объясняется только тем, что солнце—более могущественное небесное тело, и в отношении к нему движения планет и звезд становятся очень простыми.

7. Относительность пространства и времени. Относительность движения.

Что же такое вообще абсолютное и относительное? Существует ли абсолютное место и время или абсолютное движение? Представим себе бесконечное и совершенно пустое пространство и в нем некоторую точку. Где находится эта точка? Ее положение совершенно неопределимо, с одинаковым правом можно утверждать, что она лежит в середине, или вправо, или влево от середины; во всех случаях пространство простирается от нашей точки во все стороны в бесконечность. Если теперь представить себе, что в пространстве появилась еще другая точка, то положение вещей совершенно меняется; и в этом случае я не могу утверждать ничего абсолютного о положении второй точки, но я могу определить ее положение относительно первой точки, пользуясь некоторой системой мер. Вы-

бирая первую точку за начало системы координат, я могу сказать, что вторая точка лежит на x сантиметров вправо, y сантиметров назад, и z сантиметров выше первой точки; x , y , z ,—координаты второй точки относительно первой. Таким образом места совершенно относительно.

Нет нужды подробно останавливаться на том, что то же заключение справедливо и в отношении времени. Каждому известно, что указание времени имеет смысл только тогда, когда указано, от какой нулевой точки производится счет, т.-е., напр., „после сотворения мира“ (если бы нам только было известно, когда именно произошло это важное событие) или „после Рождества Христова“, „час спустя после начала моего опыта“ и т. д. Таким образом и время по существу относительно, т.-е., яснее говоря, всякое указание времени имеет смысл только в отношении некоторой нулевой точки времени.

Если, однако, и время и пространство относительно, то отсюда автоматически вытекает относительность производного понятия движения. Некоторое тело движется, т.-е. оно меняет свое положение в пространстве со временем, но мы знаем уже, что понятие „положения“ имеет смысл только в отношении к определенному другому телу.

То же самое справедливо в отношении движения всякого рода. Есть, однако, существенное различие прежде всего между прямолинейным и криволинейным движением; первый род движения соответствует перемещению, второй—вращению. Во-вторых, существенно различие между равномерным и неравномерным движением. Перенос-

ное движение и вращение могут быть равномерными и неравномерными, хотя, с более общей точки зрения, только переносное движение может быть равномерным, так как в нем скорость и направление движения не изменяются, во вращательном же движении постоянной остается только скорость, направление же движения постоянно. В этом смысле все движения могут быть разделены на два основных типа: 1) прямолинейно-равномерные движения, 2) все остальные, т.-е. прямолинейно-неравномерные, равномерно-криволинейные и, наконец, неравномерно-криволинейные. Для нас такое разделение существенно, так как для первого класса движений имеет силу специальный принцип относительности, для остальных же—общий принцип.

Из того положения, что абсолютного места и времени не существует, вытекает, хотя и чисто формально, относительность движения; мы должны, однако, еще остановиться на этом следствии, так как для понимания его необходимо большее напряжение мысли, чем для понимания двух исходных положений. Легко видеть, что точка в пустом пространстве не занимает никакого определенного места. Если эта точка совершает движение, то она переходит из одного места в другое; но оба эти места, кроме их временной связи, ничем не отличаются друг от друга. Движение не приводит ни к какому новому эффекту: как раньше в пустом мире где-то существовала некоторая точка, так и теперь она по-прежнему где-то существует. Таким образом движение в пустом пространстве не имеет никакого смысла; и если мыслить последовательно,

то необходимо далее сказать, что в пустом пространстве не существует вообще никакого движения.

Рассмотрим поезд, равномерно движущийся на свободном прямом перегоне. В этом поезде находимся мы с вами. Мы говорим: поезд движется, и мы вместе с ним. Но удалим все то, что выдает движение поезда, т.-е. предположим, что поезд выстроен идеально, так что от движения не возникает никакого шума и толчков, закроем окна нашего купе—тогда движение поезда останется для нас незаметным. Если бы даже снова появился грохот поезда и стук колес, то это не доказывало бы еще необходимости движения именно поезда; шум мог бы возникнуть и от попятного движения полотна дороги под поездом; впрочем, эта мысль кажется нам смешной, и мы отказываемся серьезно ее развивать. Откроем теперь снова занавески нашего купе и посмотрим наружу: снова ничто не доказывает движения поезда. Даже наоборот, наше наивное ощущение говорит нам, что ландшафт пролетает мимо поезда. Конечно, в это дело очень скоро вмешивается холодный рассудок и заявляет о бессмысленности такого заключения: ландшафт не может двигаться, движется поезд, и мы вместе с ним. Лучший выход из всех этих противоречий—осторожное заключение об относительном движении поезда и земли. Чтобы показать, что предположение о движении земли, а не поезда, не так уж смешотворно, рассмотрим такой случай. Пусть наш поезд стоит на пути у перрона вокзала, дожидаясь своего отправления по расписанию; на соседнем пути

стоит другой поезд. Как раз по расписанию мы отправляемся, двигаясь относительно неподвижно стоящего соседнего поезда. Но что такое произошло? Соседний поезд уже совершенно исчез из глаз, но зато стало видным станционное здание, которое он от нас закрывал. Мы, очевидно, на прежнем месте и только теперь мы понимаем, что ушел не наш поезд, а соседний, и притом в противоположном направлении; поезд ушел в тот момент, когда должны бы двинуться по расписанию мы; нам, очевидно, придется ждать следующей очереди. Что же можно сказать по поводу нашего поезда? Он оставался в покое относительно земли, но двигался относительно соседнего поезда. Наглядный случай подобных „обманов“ можно наблюдать, если, стоя на мосту, рассматривать равномерно, но быстро движущийся водяной поток. Если при этом не видно берегов, с находящимися на них предметами, то очень скоро наступает момент, когда наблюдатель определенно верит, что он едет на мосту вниз по реке, находящейся в покое; только взглянувши на берега, наблюдатель убеждается в ошибке.

Возьмем теперь такой случай из практической жизни, к которому мы опять с успехом можем приложить наше заключение. Мы собираемся пилить дрова. Осуществить это можно двояко: или твердо придерживая полено и двигая взад и вперед пилою, либо, наоборот, укрепивши неподвижно пилу и двигая полено; результат в обоих случаях будет один и тот же, полено распилится. Существенно не абсолютное, а относительное движение двух тел друг относительно друга.

Выбором формы и материала двух тел мы достигаем того, что распиливается полено, а не пила.

Наконец рассмотрим еще один пример, из которого будет ясно, что даже такое движение, в реальности которого никто не сомневается, в действительности может рассматриваться в некотором смысле как абсолютный покой. Представим себе, что техника воздухоплавания настолько усовершенствовалась, что облететь землю по экватору возможно в одни сутки, осуществилась мечта Фауста. Путешествие начинается как раз в тот момент, когда солнце готово закатиться. Тогда произошло бы нечто странное: летчик будет постоянно видеть вечернюю зарю:

Зарю б вечною блистали
Передо мной земли края,
Холмы в пожаре бы пылали,
Дремали доли в мирном сне,
И волны золотом играли,
Переливаясь в огне.

(Фауст, ч. I, перев. Веневитинова).

Движение земли вокруг оси компенсируется противоположным и равным движением воздушного корабля. Можно рассматривать такое положение вещей с двух точек зрения. Можно, напр., утверждать, что летчик движется на запад, тогда и солнце, очевидно, должно двигаться в том же направлении (движения относятся к неподвижной земле—Птоломеева точка зрения). Можно, однако, все интерпретировать и иначе, утверждая, что земля движется на восток, солнце—неподвижно (точка зрения Копер-

ника), тогда, очевидно, и воздушный корабль остается в покое, не движется. Первое толкование самое простое, но узкое, второе несколько отвлеченно, зато широкое, так как в солнечной системе воздушный корабль, очевидно, неподвижен. Задача остаться в покое в солнечной системе равносильна для летчика головокружительному полету на запад со скоростью 1700 километров в час; летчик должен напрягать все усилия, чтобы вырваться от увлекающей его земли.

8. Скорость. Принцип сложения скоростей. Изменение скорости. Ускорение. Инерция.

Мы уже говорили о том, что определение положения некоторого тела зависит от выбора точки отсчета; если, напр., для одной точки отсчета координата тела будет x , для другой точки отсчета, отстоящей от первой на расстояние a вправо, координата будет $x - a$. Расстояние между двумя точками будет между тем одинаковым для обеих точек отсчета. Для первого случая оно будет таково:

$$x_2 - x_1$$

для второго

$$(x_2 - a) - (x_1 - a) = x_2 - x_1.$$

Таким образом расстояние между двумя точками при такого рода переходе от одной точки отсчета к другой, как мы уже раз говорили, остается инвариантом. То же самое можно утверждать и относительно времени. Момент есть по-

нятие относительное, а промежуток времени неизменен; если промежуток времени между точками отсчета будет, напр., b , то очевидно, что

$$(t_2 - b) - (t_1 - b) = t_2 - t_1.$$

Тридцатилетняя война по всем календарям, откуда бы они ни начинали свое летосчисление, длилась 30 лет.

Свяжем теперь время с пространством, рассмотрим изменение положения со временем, иначе говоря скорость движения. Ясно, что скорость для двух разных точек отсчета, если только последние находятся в покое, будет одинакова, т.-е. инвариантна; очевидно, что начальное и конечное положение движущейся точки можно рассматривать, как две точки, а пройденный путь, как некоторый отрезок, соединяющий эти точки. Как, однако, будет обстоять дело в том случае, если одна из точек отсчета все время в покое, а другая в начале совпадет с первой, а затем начинает двигаться с определенной скоростью v в направлении оси X ? Ясно, что скорость движения точки V во втором случае окажется меньше, чем в первом: если в первом случае она была V , то во втором она окажется равной $V - v$; если, наоборот, во втором случае движение будет происходить в обратном направлении с тою же скоростью v , то мы найдем, что скорость движения будет $V + v$. Если вторая точка отсчета движется с такою же скоростью V вправо, как и рассматриваемая точка, то в результате получится скорость $V - V = 0$, т.-е. точка будет находиться в отношении ко второй точке отсчета в покое.

Подобные случаи происходят очень часто и кажутся нам совершенно понятными. Если я, напр., сижу в движущемся вагоне, то я движусь вперед, но как раз со скоростью вагона, поэтому в отношении к последнему я в совершенном покое.

Во всем этом скрывается одно весьма простое, но важное для последующего положение: принцип сложения скоростей. Движение тела, входящего в движущуюся систему и кроме того совершающего собственное движение, выразится суммой обоих движений.

Сделаем шаг дальше и рассмотрим изменение скорости. Легко видеть, что хотя скорость движения точки зависит от состояния движения системы отсчета, изменение скорости не зависит от движения системы. Изменение скорости можно произвести, прилагая некоторый импульс, напр., действуя ударом, или, вообще говоря, воздействуя на тело. Представим себе, напр., что скорость бильярдного шара ударом кия изменена с 5 ст. в сек. до 10 ст. Если бы бильярдный стол находился в вагоне, движущемся со скоростью в 2 ст., то начальная скорость шара относительно неподвижного полотна дороги была $5 - 2 = 3$, после удара $10 - 2 = 8$; тем не менее изменение движения осталось прежним, т.-е. $8 - 3 = 5$. Все это нас приводит к выводу, что законы движения бильярдных шаров совершенно одинаковы как в равномерно и плавно катящемся салон-вагоне, так и в комнате.

Еще один маленький шаг дальше. Он не несет с собою ничего существенно нового, но приведет нас к новым и важным понятиям. Удар

биллиардного шара длится очень недолго и, следовательно, шар за весь свой путь испытывает только одно изменение скорости в течение очень короткого времени (мы отвлекаемся от изменения скорости в начале и в конце движения шара).

Представим себе теперь, что некоторое тело непрерывно подвергается действию чрезвычайно коротких ударов; в таком случае изменение скорости будет происходить также непрерывно; если удары будут равными по силе, то изменение скорости в единицу времени будет величиною постоянною, иными словами, тело будет совершать равномерно-ускоренное движение.

Так, напр., камень падает под действием таких таинственных непрерывных и равных толчков и совершает равноускоренное движение. Говорить о „толчках“ в этом случае не совсем удобно; мы введем новое понятие „силы“. В случае камня эта сила будет постоянной, мы называем ее силой тяжести. В итоге мы приходим к заключению, что ускорение есть результат воздействия силы. Не нужно, однако, слишком свободно истолковывать это заключение. Нельзя, напр., сказать: теперь я знаю, почему падает камень, причина—сила тяжести. Мы ведь не открыли ничего нового, мы изобрели только новое понятие, удовлетворяющее нашей потребности искать всюду причинность. Вместо того, чтобы сказать: камень падает равномерно-ускоренно, мы говорим: он подвергнут силе тяготения; одна фраза ничуть не говорит больше другой, обе они только различные способы выразиться.

Но, может быть, читатель заметит, что мы построили здание без фундамента. Нам понадо-

билось ввести „причину“ для объяснения ускоренного движения, но ведь мы забыли ввести причину для случая равномерного движения. Этот пробел можно сейчас же заполнить и притом самым простым образом: мы утверждаем, что равномерное движение, как таковое, т.-е. не имеющее ускорения, не имеет и причины, оно происходит „само по себе“. Тело, на которое не действуют никакие силы, движется прямолинейно и равномерно. Мне кажется, я слышу протест, притом довольно резонный: мне говорят, что изложенная интерпретация искусственна и противоречит обычной, наивной.

Рассмотрим эту наивную интерпретацию; коротко говоря, она заключается в следующем: тело, предоставленное само себе, остается в покое; тело, на которое подействовал некоторый импульс, движется в течение некоторого очень короткого времени и затем останавливается; тело же, на которое все время действует некоторая постоянная сила, движется с постоянной скоростью. Такое рассуждение на первый взгляд как будто имеет многое, говорящее в его пользу: рассмотрим, напр., движение автомобиля: пока мотор не пущен—машина в покое; если мотор действует все время с одной и той же силой, автомобиль катится равномерно; стоит выключить мотор, машина почти мгновенно останавливается. Отсюда как будто вытекает, что следствием действия постоянной силы будет равномерная скорость, для получения же ускорения нужно увеличивать силу. Легко, однако, видеть, что интерпретация такого рода неверна или, осторожнее выражаясь, очень неудобна. В самом

деле, если мы рассмотрим в явление внимательнее, то найдем, что после включения мотора, автомобиль не сразу начинает двигаться равномерно: вначале его скорость возрастает и постепенно приобретает постоянную величину. Сила мотора вызывает ускорение, но только до известного предела; почему же оканчивается это ускорительное действие? Очевидно, существует причина, действующая в противоположном направлении; эта причина—трение колес машины о мостовую и всего корпуса автомобиля о воздух. Это трение тем больше, чем больше скорость автомобиля, и в конце концов оно приобретает такую величину, что уравнивает силу мотора. Мы возвращаемся таким образом к нашему прежнему воззрению: как только автомобиль достиг максимальной равномерной скорости движения, он движется уже без действия сил, „сам по себе“, так как сила двигателя и противодействие трения друг друга взаимно нейтрализуют.

Для этого свойства материи введено особое название „инерции“, или „костости“. Можно, конечно, сделать возражение, что это свойство не позволяет различить состояние покоя и равномерного движения вещества. По теории относительности оба эти состояния совпадают по существу. Не становясь, однако, пока еще на почву этой теории, мы легко можем различить два состояния: тело, предоставленное и теперь и прежде самому себе, находится в покое, тело же, в настоящий момент предоставленное самому себе, но ранее подвергавшееся действию некоторого импульса, движется прямолинейно и равномерно.

Из возражений, которые можно сделать по поводу закона инерции, очень существенно следующее: „что надо понимать под прямолинейным и равномерным движением?“ Такое определение необходимо предполагает некоторую систему отсчета, для тела же, вполне предоставленного самому себе, мы не имеем права вообще вводить какое-нибудь вспомогательное тело или систему. Над этим вопросом много ломали голову даже в последнее время, но в сущности понапрасну. Выбрав какую-нибудь систему отсчета, относительно которой движение прямолинейно и равномерно, мы находим, что для любых систем, равномерно и прямолинейно движущихся относительно первой, закон инерции также выполняется. С другой стороны для систем отсчета, движущихся с ускорением, закон инерции теряет смысл. Таким образом закон инерции относится ко всем системам координат, движущимся прямолинейно и равномерно.

Инерция — основное свойство материи, она соответствует некоторому сопротивлению движению; это сопротивление вполне определено для всякого тела и характеризуется „массой“, или, точнее говоря, „инертной массой“. Масса и инерция не являются сопротивлением движению вообще, но только ускоренному движению. Я приведу для большей ясности еще два примера из таких разнородных областей, каковы техника и психология. Мне могут сказать: равномерное движение нужно сначала получить, на что затратится работа, следовательно, применение работы как будто требуется и в равномерном и в ускоренном движении. Но это не-

верно. Напр., трамвайные акционерные общества упорно не желают вводить новых остановок трамвая, так как наибольший расход при передвижении вагона происходит не на участках равномерного движения вагона, а именно на остановках, где должны возникать соответственно замедление и ускорение движения; если бы условия движения были идеальными, то прогон трамвая между двумя остановками вообще бы ничего не стоил; расходы возникают, когда приходится преодолевать инерцию вагона. Обратимся теперь к совершенно иной области—области наших ощущений. Я напомним прекрасные опыты, которые показывал недавно умерший физик и натур-философ Эрнет Мах своим посетителям в Праге. Посетители усаживались внутри совершенно замкнутого ящика, отделявшегося от земли и висевшего на конце длинного рычага. Рычаг вместе с ящиком мог вращаться вокруг вертикальной оси, помещавшейся в центре большого зала. Таким образом ящик вместе с пассажирами мог совершать круговые движения. Пассажиры должны были определить изнутри ящика, какие именно движения они совершают: стоят ли они неподвижно, движутся ли вперед или назад и т. д.

Ответы оказывались довольно странными. Когда вращение начиналось, пассажиры заявляли, что они движутся вперед; когда вращение становилось равномерным, у пассажиров возникала уверенность, что они стоят неподвижно; наконец, при остановке движения пассажирам казалось, что они движутся назад. Таким образом мы не ощущаем скорости (мы не можем отличить ее от покоя) и ощущаем ускорение.

В немногих словах смысл наших длинных рассуждений таков: скорость не является существенным признаком движения, движение характеризуется ускорением. Это положение лежит в основе так называемой классической механики, т. е. учения о движении тел в пространстве, возникшего в XVII и XVIII веках. Три математические величины играют решающую роль в механике: ускорение, сила и масса; между этими величинами существует соотношение, которому можно придать две различные формы, математически тождественные, но несколько различные с точки зрения теории познания. Если исходить из опытного понятия ускорения B и массы m , то мы получим такое определение силы K :

$$K = m \cdot B;$$

наоборот, предполагая данной и действительной силу, получим определение ускорения:

$$B = \frac{K}{m}.$$

Все явления движения могут быть описаны такими математическими законами, в которые входят эти три величины: K , m , B . Существуют законы, в которые входят только две из этих трех величин; таков, напр., закон тяготения Ньютона. Об этом будет речь ниже.

9. Процессы в движущихся системах. Классический принцип относительности. Преобразование Галилея.

Мы займемся теперь вопросом о том, как протекают механические явления, т.-е. явления движения, в зависимости от того, находится ли та система, на которой все эти события развиваются, в покое или движется прямолинейно и равномерно. Мы уже достаточно подготовили почву для ответа: механические явления в обоих случаях будут протекать совершенно одинаково. Ускорения, а следовательно, и силы одни и те же для какой угодно прямолинейно и равномерно движущейся системы, а потому никаких различий в них возникнуть не может. В одном случае тела совершают только ускоренные движения под действием сил, в другом к этим движениям присоединяется переносное движение всего пространства, в котором происходит явление; но это переносное движение совершенно неощутимо для наблюдателя, движущегося вместе с системой. Я могу играть в едущем вагоне не только на биллиарде, сообщая шарам некоторые импульсы ударом кия, можно играть и в мяч, заставляя действовать на него кроме импульса, направленного вверх, и постоянную силу тяжести, направленную вниз; при этом переносное движение в пространстве в горизонтальном направлении не оказывает никакого влияния на движение мячика. Я вижу, как мяч, несмотря на движение вагона, поднимается отвесно вверх и падает вниз тоже по отвесу, я могу ловить мяч с той же уверен-

ностью, как и у себя дома, в комнате. Короче говоря, всякие механические явления в вагоне происходят совершенно одинаково как в случае неподвижности вагона, так и в случае его равномерного прямолинейного движения. Но, разумеется, все протекает совершенно иначе для наблюдателя, находящегося снаружи. Предположим, что я перешел из вагона на рельсы, попросив моего приятеля, оставшегося в вагоне, бросить вверх мяч по отвесной линии в тот момент, когда он будет проезжать мимо меня. В таком случае переносное движение мяча наложится на то ускоренное движение, которое он производит под влиянием силы тяготения, и я увижу движение по параболе, подобное тому, какое описывает снаряд, выпущенный из орудия.

Может быть и в данном случае будет полезно обратиться к психологическим, субъективным ощущениям, связанным с движением системы, в которой мы находимся. В этом отношении известнее всего пресловутая морская болезнь, проявляющаяся не только на море, но иногда и в поезде, доводя до нашего сведения самым неприятным образом о движении системы. Можно утверждать с полной уверенностью, что ни в случае движения корабля, ни в случае движения поезда даже самый чувствительный пассажир не испытает признаков морской болезни, если только движение происходит прямолинейно и равномерно, так как это движение совершенно неощутимо для пассажира, находящегося, напр., в каюте с завешенными окнами. Болезнь, однако, появится, как только пассажир посмотрит в окно и заметит пробегающий мимо пейзаж. Не суще-

ствует абсолютной морской болезни, есть только относительная, при чем безразлично, кто движется на самом деле: пассажир или окружающая обстановка. Почувствовать признаки морской болезни можно, напр., рассматривая в кинематографе ленты, снятые с качающегося корабля.

Мы пришли таким образом к принципу относительности классической механики. Он может быть выражен так: явления движения, происходящие в различных системах, движущихся прямолинейно и равномерно одна по отношению к другой, протекают во всех случаях совершенно одинаково, все системы равноценны, и из изучения такого рода движений нет возможности судить о том, движется ли некоторая система на самом деле, или находится в покое. Существует только движение одной системы относительно другой. Для рассматриваемых систем в теории относительности существует название инерционных систем, ибо в данном случае движение системы происходит по инерции.

Нам нужно еще формулировать полученный результат математически. Эта математика столь проста, что даже самый трусливый читатель может не пугаться. Пусть в покоящейся системе координат с осями X , Y и Z координаты точки наблюдения будут x , y , z . Пусть существует теперь другая система, совпадающая в начальный момент с первой и движущаяся с постоянной скоростью v вдоль оси X ; в таком случае обе оси x у обеих систем все время совпадают, обе другие координаты однако смещаются одна в отношении другой. Координаты точки наблюдения y и z останутся теми же самыми и в дви-

жущейся системе, координата же x будет убывать со временем на v сантиметров в секунду; за некоторый промежуток времени t от начала счета координата x в движущейся системе уменьшится на $v.t$ сантиметров; обозначив значения координат в нашей движущейся инерционной системе через x' , y' и z' , найдем:

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

Подобные соотношения носят название преобразования координат, при чем в данном случае они названы в честь великого основателя классической механики „преобразованиями Галилея“.

10. Вращение. Объективные и субъективные признаки. Обруч. Волчок. Маятник Фуко. Вращающаяся жидкость. Попытка распространения классической теории относительности.

Нам нужно расширить полученные результаты еще в некоторых направлениях: в отношении движения, остающегося равномерным только по величине, в отношении общего случая ускоренных движений и, наконец, в отношении носителя движения—материи.

Кроме относительного равномерно-прямолинейного движения двух систем может произойти также и равномерное вращение одной системы относительно другой. Примерами такого движения служит вращение земли вокруг ее оси и годовое вращение вокруг солнца, при чем в данном случае мы описываем явление так, как оно кажется с солнца; земной наблюдатель в этом случае

говорит об ежедневном заходе и восходе солнца и о годичных изменениях его пути по небесному своду. Примерами вращательных движений, происходящих на самой земле, могут служить вращение волчка на столе или вращение сосуда с водой, вокруг оси сосуда, проходящей через веревку, подвешенную к потолку комнаты. Эти земные явления для нас столь естественны, что крайне затруднительно истолковывать их как-нибудь иначе: нам и в голову не придет утверждать, напр., что, может быть, волчок находится в покое, а под ним вертится стол, или что вращается вся комната, а не сосуд с водой. Но уже при анализе переносных движений мы убедились, насколько опасны предвзятые мнения, поэтому и в данном случае мы постараемся приступить к делу насколько возможно непредубежденно.

Представим себе в безграничном пустом пространстве вращающийся шар и выберем на нем какую-нибудь точку, напр., одну из точек экватора. Для того, чтобы быть непосредственными свидетелями происходящего, поместимся сами в эту точку. При вращении шара точка, в которой мы находимся, через некоторый промежуток времени перейдет в другую точку пространства. Есть ли, однако, возможность каким-нибудь способом это заметить? Такой возможности, очевидно, не существует: вращения мы не заметим. Кто-нибудь из более придирчивых читателей возразит на это, что при вращении мы испытаем головокружение, подобно тому, как это ощущается на качелях, каруселях и т. д. По поводу такого возражения мы напомним только, что

все такого рода неприятные „болезни перемещения“, т.-е. морская болезнь и головокружение, как мы видели выше, имеют чисто относительный характер, а отнюдь не абсолютный. Поэтому головокружение появится у нас и в том случае, если будем вращаться не мы, а окружающая обстановка. С другой стороны, если вокруг нас „пустое пространство“, то наше вращение—сплошная фикция, никакого головокружения у нас не будет. Быть может, кто-нибудь заметит, что головокружение будет ощущаться и в том случае, когда человек находится в совершенно замкнутом вращающемся помещении. Объяснение этого заключается в том, что человек—очень сложная система, отдельные части которой при вращении перемещаются относительно других (напр., жидкое содержимое внутренних органов). Наблюдающееся головокружение является снова следствием относительных движений. Движения, происходящие при этом, настолько сложны, что лучше в них не углубляться.

Вернемся, однако, от субъективно-физиологического к объективно-физическому (можно, конечно, спорить о том, насколько можно считать эти области противоположными), спросим себя, не существует ли, однако, какого-нибудь объективного признака абсолютного вращения—своего рода „головокружения“, испытываемого телом, вращающимся в пустоте. Конечно, это вопрос такого рода, что внутренне убежденный мыслитель не будет им и заниматься, заявив, что абсолютное вращение невозможно логически, а потому все остальные соображения излишни. Не будем, однако, столь высокомерными и неосто-

рожными. Для нас ясно, конечно, что случай вращения по существу отличается от переносного движения, если и не в отношении к пустому пространству, то, может быть, по внутренним соотношениям. Укажем по крайней мере на следующее важное обстоятельство: при переносном движении все точки тела имеют одну и ту же скорость, при вращении же шара скорость точки тем меньше, чем ближе она к оси вращения, на самой оси скорость вращения равна нулю. Мы могли бы поэтому заключить, что в данном случае существуют внутренние относительные процессы. Но такое заключение совершенно ошибочно: шар при вращении остается тем же самым не только в целом, но и в каждой части, что объясняется тем, что в данном случае все процессы определяются не обычной, а угловой скоростью, которая для всех точек одна и та же. Если мы обозначим угловую скорость через w , а через r —расстояние вращающейся точки от оси вращения, то обычная скорость движения точки будет:

$$v = w \cdot r$$

или угловая скорость:

$$w = \frac{v}{r}$$

Выхода, следовательно, нет, абсолютное вращение твердого шара в пустом пространстве не имеет смысла. Если шар нетвердый, то он сам по себе является миром, части которого могут передвигаться одна относительно другой.

Освободившись от предрассудков, мы можем теперь с значительным хладнокровием вернуться

в мир действительности, уже не в пустое пространство, а наполненное материей. Приступим к рассмотрению происходящих здесь явлений с тем же настроением, с каким убежденный естествоиспытатель приходит на спиритический сеанс. Мы будем все внимательно наблюдать, но при истолковании виденного не будем поддаваться обману кажущегося; мы уже знаем раз навсегда, что абсолютных движений и действий не существует, что все нужно рассматривать как относительное.

Рассмотрим сначала случай катящегося обруча, который дети подгоняют ударами палочки; до тех пор, пока обруч катится, он не падает. Это явление можно объяснить очень просто и в то же время ясно: обруч не падает потому, что не знает, в какую сторону ему упасть. Если, скажем, обруч стал наклоняться влево, то, прежде чем этот наклон станет значительным, катящийся обруч успеет повернуться на половину, верх и низ переменяются местами, и наклон влево обратится в наклон вправо. Обруч не опрокинется, а станет качаться вправо и влево, и тем сильнее, чем медленнее он движется; если наконец скорость станет столь малой, что за половину оборота обруч успеет наклониться до земли в в какую-нибудь сторону — он упадет. Во всяком случае это явление совершенно относительного характера, дело сводится к положению обруча относительно земной поверхности, и если бы земля двигалась под обручем, вращающимся на одном месте, мы получили бы тот же самый эффект. По существу совершенно так же обстоит дело и с волчком, разница только в

том, что волчок вращается на одном месте, при чем ось вращения (в простейшем случае) вертикальна. Волчок удерживается в вертикальном положении опять-таки потому, что направление наклона благодаря вращению волчка все время меняется. В действительности дело обстоит значительно сложнее. Ведь и неподвижный волчок не должен по существу упасть, он падает только из-за недосмотра, благодаря тому, что дан какой-нибудь ничтожно малый толчок, благодаря которому получается все возрастающий наклон; мы имеем дело с так называемым „неустойчивым“ равновесием. Такое равновесие в идеальном случае, когда исключены все случайные влияния, является таким же действительным равновесием, как и устойчивое. Принципиально нет разницы между покоящимся и вращающимся волчком; фактическое различие сводится к тому, что в покоящемся волчке всякое случайное воздействие вызывает эффект во вполне определенном направлении, приводя к падению волчка, в случае же вращающегося волчка случайное воздействие, благодаря вращению системы, приводит к тому, что ось вращения описывает конус. Во всяком случае и здесь направление воздействия не абсолютно, а определяется в отношении плоскости стола, на котором вращается волчок. Мы получили бы те же самые результаты, если бы волчок оставался неподвижным, а вращался бы стол: волчок будет по-прежнему стоять вертикально; если вращение стола станет замедляться и наконец прекратится, то мы получим уже знакомое неустойчивое равновесие; дело вкуса утверждать

ли, что волчок упадет на стол, или стол на волчок¹⁾.

Одним из знаменитейших опытов подобного типа является опыт Фуко с маятником. Представим себе, что этот маятник, который состоит из очень длинной нити с тяжелым шаром на конце, подвешен на северном полюсе земли. Перенесемся мысленно на северный полюс и станем наблюдать за положением плоскости колебаний маятника по кругу с делениями, расположенному на поверхности земли под маятником. Мы увидим, что плоскость колебаний маятника совершает за сутки полный оборот. По Птолемею, маятник действительно вращается, по Копернику же, наоборот, плоскость колебаний маятника остается неизменной в пространстве, вращается же земля вместе с расположенным на ней кругом с делениями. Этот опыт соответствует опыту авиатора над экватором в случае переносного движения, о котором мы говорили выше. Однако тут есть и разница: для того, чтобы освободиться от движения вместе с землею, летчик должен непрерывно работать, иначе он упадет на землю; маятник Фуко удерживает плоскость своего колебания сам по себе. Одно и то же свойство материи, ее инертность, обуславливает зависимость летчика от переносного движения земли

¹⁾ Не скроем, что эти рассуждения не совсем точны (как и в дальнейшем). Для точности изложения нам пришлось бы теперь же заняться природой того пространства, в котором мы живем, и ввести новую геометрию, что привело бы читателя в сильнейшее замешательство. В дальнейшем мы получим хотя бы приближенное понятие о смысле наших утверждений.

и независимость маятника от вращательного движения земли. Как бы там ни было, во всяком случае ясно, что опыт Фуко не доказывает ничего абсолютного; он служит наглядным доказательством относительного вращения земли и солнца. Этот опыт потому особенно интересен и важен, что он показывает возможность постановки на земле космических опытов; маятник Фуко принадлежит космосу, на земле он, так сказать, гость.

Мы рассмотрим теперь еще более поучительные явления. Если мы насадим сосуд с водою на ось вращения и заставим вертеться, то очень скоро поверхность воды примет новую форму, получится новое пространственное распределение жидкости. Горизонтальная плоскость покоящейся жидкости при вращении станет вогнутой, и тем больше, чем быстрее вращение; частицы воды приобретают тенденцию передвигаться из середины к краю сосуда и там накапливаться, соответственно противодействующей такому передвижению силе тяжести. Другое явление, которое мы рассмотрим, заключается в следующем. Пусть внутри жидкости плавает масляный шар, плотность которого такая же, как и жидкости (напр., смесь воды со спиртом). Вставим внутрь шара ось с рукою для сообщения шару вращения. При вращении мы заметим, что шар начнет сплющиваться, и тем сильнее, чем быстрее вращение; в конце концов шар сплющится в лепешку. Земля испытала такое же сплющивание, правда, в очень незначительной мере, в то время, когда она была в расплавленном состоянии; при застывании сплющивание сохранилось. Рассмот-

ренные факты являются результатом особой силы, развивающейся при вращении и называемой центробежной. После того, как мы уже получили определенную картину механических процессов и сил, нам ясно без дальнейших пояснений, что центробежная сила есть не что иное, как особое проявление инерции. Если некоторая точка вынуждена вращаться вокруг центра, то в каждый момент в ней существует стремление выйти из вынужденной круговой орбиты и двинуться прямолинейно по касательной. Следовательно, центробежная сила есть особая форма инерции; отсюда ясно, что она тем больше, чем массивнее тело. Если, напр., в опыте с жидкостью во вращающемся сосуде мы заменим воду ртутью, то искривление поверхности и стремление жидкости к краям сосуда станет особенно сильным.

Итак, перед нами целый букет явлений, характеризующих вращение: сохранение плоскости колебания и вращения, искривление поверхности жидкости, сплющивание жидкого шара. Мы наслаждаемся запахом букета, но не поддаемся дурману. Действительно, все это—признаки вращения, но не абсолютного, а относительного. К сожалению, у нас нет возможности произвести опыт со сплющиванием жидкого масляного шара в пустом пространстве; но производить такой опыт и не нужно, мы заранее убеждены, что сплющивания не будет, потому что вращение в пустом пространстве—уже не вращение, оно не имеет смысла, не может иметь никаких признаков и действий. В действительности всякое тело всегда вращается в пространстве, в котором (хотя бы и в большом удалении) су-

ществуют другие тела; тело вращается относительно других тел. Мы можем с равным правом утверждать, что наше тело вращается, остальное же тела находятся в покое, или наоборот. Много трудов потрачено на постановку решающих опытов в этом направлении; испытываемые тела устанавливались вблизи больших вращающихся масс, напр., около фабричных маховых колес, с целью обнаружить те признаки вращения, о которых мы уже говорили, в том случае, когда само тело находится в покое, а окружающие массы вращаются; все эти опыты не привели к определенному результату в силу чисто экспериментальных затруднений. Наблюдаемые нами искривление поверхности и сплющивание жидких тел при вращении — явления очень резкие и легко заметные. Не считая эти явления результатом вращения, мы должны как-нибудь объяснить их в согласии с нашими представлениями. Инерция (в форме центробежной силы) не может служить для этой цели, сплющивание должно произойти и в покоящемся теле, находящемся среди вращающихся масс. Мы вынуждены, следовательно, сделать шаг дальше и ввести силы, действующие между телами, способные вызывать наблюдаемые нами эффекты при относительном вращении тел. Эти силы должны быть, следовательно, силами тяготения особого рода. Мы знаем уже, что силы являются не чем иным, как выражением ускорений, ускорения же инвариантны, неизменны при переходе от движущихся координат к неподвижным, поэтому действие этих сил приведет к тому же результату, будет ли вращаться данное тело или окружаю-

щие тела. Читатель может, конечно, заметить, что введение подобных сил произвольно. На это можно ответить, что эти силы все же естественнее, чем таинственная абсолютная центробежная сила, нужная только для объяснения абсолютного вращения. Вводимые нами силы непосредственно примыкают к другим известным нам силам.

11. Внезапное изменение скорости. Ускоренное движение. Сила тяжести. Тяжесть и инерция эквивалентны.

До сих пор мы занимались прямолинейно-равномерным и равномерным вращательным движением, теперь мы перейдем к рассмотрению прямолинейно-ускоренного движения. Тело, положим, находится в покое и внезапно приводится в движение, или, наоборот, движение внезапно тормозится, или, вообще говоря, величина скорости изменяется. Случай внезапно остановленного поезда приобрел особую известность потому, что один выдающийся физик продемонстрировал на этом примере кажущуюся бессмыслицу принципа относительности ¹⁾. Он говорит: „Если благодаря резкой остановке поезда все в нем разбивается вдребезги в силу действия инерции, то ни один здравомыслящий не сделает заключения о том, что виною происшествия было не изменение скорости движения поезда, а резкое движение окружающего. Принцип же

¹⁾ Примечание 1.

относительности считает такое заключение возможным, полагая, что крушение могло произойти благодаря воздействию внешнего мира посредством особых сил тяготения, действовавших на внутренность поезда. На вопрос, сразу же приходящий в голову, почему при резком изменении скорости окружающего мира не обрушилась, напр., колокольня, стоящая около железнодорожного полотна, принцип относительности не имеет, повидимому, ответа, удовлетворяющего здравому смыслу. Этот физик, столь остроумный в своих остальных работах, делает в данном случае основную ошибку: правильного заключения из неверной предпосылки. Теория относительности в своем принципе эквивалентности молчаливо предполагает, что обе системы координат, об эквивалентности которых можно говорить, совершенно равноправны и самостоятельны; в данном примере этого нет. Нельзя отличать две системы—поезд и землю; с одной стороны—поезд сам по себе, с другой же—земля вместе с поездом, который является частью земли; поезд связан с землей многообразными путями, в особенности же инерцией и тяжестью; самостоятельность его выражается только в том, что он имеет свою особую скорость переносного движения, которая внезапно изменяется. Эти соотношения тотчас же прояснятся, если мы отчетливо представим себе покоящийся поезд и пробегающую под ним в обратном направлении землю. Останется ли поезд в этом случае неподвижным или будет увлекаться землей? Очевидно, произойдет последнее, и если мы хотим все-таки удержать поезд на месте, то нам

придется пустить в ход паровую машину и направить поезд вперед. Если теперь земля внезапно остановится, то для удержания поезда на месте нам придется также внезапно остановить поезд, и, конечно, в поезде, неподвижно стоящем на месте, опять произойдет крушение. Вспомним пример летчика, летящего над экватором, и представим себе, что произойдет, если земля под летчиком внезапно остановится; если летчик пожелает по-прежнему все время видеть заходящее солнце, ему придется остановить аэроплан, результат чего он сразу почувствует. Эти соображения нельзя, однако, распространять на землю, так как она является целой системой, в состав которой входит и поезд (или аэроплан), поэтому на ней ничего не произойдет. Разумеется, и на землю действуют таинственные силы тяготения, но это действие одинаково простирается на все части земли, в частности и на колокольню; все эти части испытывают одинаковое ускорение, а потому и не могут обрушиться одна на другую.

Существует хороший аппарат для демонстраций на лекциях, способный заменить землю, экспериментировать с которой неудобно. К сожалению, аппарат требует для опыта с ним большого помещения. Он состоит из длинной тележки с платформой, на которой стоит другая маленькая тележка. Обе системы легко передвигаются, тележка—по экспериментальному столу, а тележка вдоль платформы. Если тележка движется равномерно вперед, тележка не меняет своего положения и движется вместе с платформой; если же тележка внезапно оста-

навливается, тележечка продолжает движение до тех пор, пока не докатится до края платформы. Опыты можно, конечно, варьировать всевозможными способами; во всех случаях сказывается действие инерции в согласии с законами относительного движения обеих систем; абсолютное движение не играет никакой роли.

Во всех этих случаях явления усложняются тем обстоятельством, что система не является в целом твердой, но состоит из частей, способных передвигаться одни относительно других. Только этим объясняются все эффекты инерции, сказывающиеся на пассажирских поездах и их багаже, а также на маленькой тележке в вышеописанном опыте; наконец, только благодаря нетвердости системы, поверхность вращающейся жидкости искривляется. Что же произойдет, если система превратится в твердую, если мы, напр., привяжем пассажиров поезда к их скамейкам? Тогда они уже не смогут упасть вперед при внезапной остановке поезда, но произойдет нечто другое: пассажиры вдруг ощутят, что их что-то тянет вперед, эта тяга совершенно подобна действию некоторой силы, притягивающей пассажиров. Освободим теперь привязанных пассажиров; при остановке поезда они снова станут падать вперед. Почему же и в этом случае нам не представить себе действие некоторой силы? Правда, в данном случае эта сила совершенно фиктивная, но легко себе мысленно представить и такие случаи, когда сила будет вполне реальной и понятной. Представим себе, напр., что мы находимся в замкнутом ящике (мы уже проделывали один раз этот мысленный опыт); на этот

раз пусть ящик плавает где-нибудь в пространстве, при чем в нем находятся какие-нибудь маленькие предметы, которые можно брать и выпускать из рук. Я, находясь в ящике, проделываю эту операцию и замечаю, что предметы остаются на тех же местах, где я их выпустил из рук. Я делаю заключение, что нет ничего, что привело бы к проявлению действия инерции или сил, что я, следовательно, нахожусь в пустом пространстве в совершенном покое. Я мог бы, конечно, с равным правом предположить, что ящик движется прямолинейно и равномерно в каком-нибудь направлении, но это предположение совершенно неинтересно, так как оно для замкнутой системы ящика совершенно не отличается от предположения покоя. Предположим теперь, однако, что в моих опытах с маленькими телами я наблюдаю нечто совершенно иное, именно — как только я выпускаю из рук предмет, он падает равномерно-ускоренно на пол ящика. Как можно это объяснить? Очевидно, двумя способами. Я могу предположить: во-первых, что ящик движется равномерно-ускоренно вверх. Маленький предмет только до тех пор принимает участие в этом движении, пока я его держу в руках. Когда я выпускаю его из рук, он остается на прежнем месте, поэтому мне и кажется, что он падает равномерно-ускоренно вниз. С другой стороны, можно предполагать, что ящик находится в покое, но что под ним расположены некоторые массы, напр., земля, притягивающие предметы. В обоих случаях я сознаю мое положение в ящике по ощущению некоторого давления, направленного вниз: в первом

случае это давление—давление инерции, во втором—давление тяжести. В качественном отношении я совершенно не могу различить эти два состояния; с количественной стороны все зависит от того, действуют ли инерция и тяжесть на тела одинаково. Для этого нам придется заняться свойствами материи. Если мы получим утвердительный ответ, мы сможем говорить, что инерция и тяжесть эквивалентны.

12. Материя. Сила и масса. Тяготение. Ускоренное движение и постоянное силовое поле эквивалентны.

Мы говорили до сих пор очень много о движении, не занимаясь тем, что же именно движется. На это скажут, что ответ ясен без дальнейшего: движется материя. Но что же является мерою материи? Снова, повидимому, ответ очень простой: ее количество, „масса“. Но в науке требуется точность выражений; для этой цели мы можем воспользоваться уже известным нам определением; масса соответствует сопротивлению всякому изменению скорости, производимому силой. Мы уже писали уравнения, содержащие это определение.

$$B = \frac{K}{m}; \quad V = \frac{I}{m}$$

здесь B —ускорение, K —сила, m —масса, I —импульс, V —скорость. Отсюда величина массы:

$$m = \frac{K}{B} = \frac{I}{V}.$$

Масса, следовательно, есть отношение силы к соответствующему ускорению, или же отношение импульса к скорости. Иными словами, можно сказать, что масса выражает величину силы, потребную для совершения определенного действия, масса есть своего рода „емкость силы“. Мы знаем целый ряд „емкостей“ материи и в других областях физики: теплоемкость, электроемкость и т. д.

Масса определяется, следовательно, силой, но сама сила является ли чем-нибудь реальным? В исключительном случае моей мускульной силы она действительно реальна. Бросая, напр., при игре в кегли шары различной величины с тем же мускульным напряжением, я могу, наблюдая скорости шаров, определить их массы. Шары, катящиеся быстрее других, имеют наименьшую массу, медленнее других—наибольшую, при чем вообще существует обратная пропорциональность скорости. Но силы природы не реальны, они—наше измышление: такова тяжесть или электрическая сила. Определяя массу силой, мы кладем в основу определения нечто само по себе гипотетическое, строим здание на песке. Переверачивая наше уравнение, т.-е. определяя силу через массу, мы остаемся в том же положении, сводя одну неизвестную величину к другой неизвестной. Изменить этого нельзя, так как во всех наших уравнениях имеются три величины, из которых только одна—ускорение—поддается непосредственному наблюдению, обе же другие—гипотетические; одно уравнение с двумя неизвестными не может дать определенного результата. Мы имеем здесь своего рода новый

принцип относительности между массой и силой, только в отношении друг к другу та и другая имеют определенный смысл. Что выбрать за основное — дело вкуса. В технике господствует силовая система, в физике — система масс.

Если имеется уравнение с двумя неизвестными, которые желательно определить, то нужно поискать второе уравнение между теми же неизвестными; имея два уравнения с двумя неизвестными, мы можем решить задачу вполне. Второе уравнение в нашем случае действительно существует и уже больше двух веков: оно установлено великим Ньютоном, увенчавшим таким образом систему механики. Это уравнение — знаменитый закон тяготения Ньютона. Оно сводит движения небесных светил и ряд земных явлений к проявлению особых сил, существующих в самих телах и действующих на расстоянии. Величина этого дальнего действия по Ньютону пропорциональна массам обоих взаимодействующих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Математически ¹⁾:

$$K = \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Мы сразу же замечаем, во-первых, что мы имеем дело с взаимодействием, так как каждая из масс притягивает одна другую по тому же закону; во-вторых, этот закон неизменен, инвариантен для любой инерционной системы координат, так как само r в таких системах, как мы уже знаем, инвариантно. С другой стороны, нас поражают

два обстоятельства: прежде всего, в формулу совершенно не входит время или связанные с ним величины — скорость и ускорение, хотя тяготение и определяет чисто механические явления движения. С другой стороны, в законе тяготения масса играет совершенно новую роль носительницы активной силы, а не пассивного сопротивления (инерции); это уже не инертная, а тяготеющая масса. Различие этих двух понятий станет ясным при рассмотрении простейшего случая падения камня. Активная, тяготеющая масса вызывает падение камня вниз, пассивная, инертная масса вызывает сопротивление такому движению. Как мы уже знаем, сила притяжения является не чем иным, как произведением пассивной массы на ускорение, эта сила — вес тела:

$$P = m \cdot B.$$

Активная масса измеряется в единицах веса одного кубического сантиметра воды, пассивная — в единицах массы того же объема воды. Из наблюдения известно, что при устранении сопротивления воздуха все тела, легкие и тяжелые, падают с одною скоростью, откуда мы заключаем, что тяготеющая и инертная масса равны между собою. Справедливость и всеобщность такого заключения проверена в последнее время точнейшим способом венгерским физиком Этвешем (Eötvös). Этот результат для нас чрезвычайно важен тем более, что он кажется чрезвычайно загадочным; две величины, определенные и введенные в физику совершенно различными путями, одна статическая, другая кинетическая, фактически оказываются тождественными. Нам

¹⁾ Примечание 2.

придется, конечно, еще вернуться к этой загадке.

Только теперь нам станет понятным значение наших рассуждений и соображений по поводу замкнутого ящика, парящего в пустоте, и поезда. Мои наблюдения в замкнутом ящике только потому и не отличаются в случае равноускоренного движения ящика и в случае ящика, находящегося в покое, но подвергнутого действию тяготеющих масс, что все тела падают с одинаковой скоростью. Только поэтому я не могу по существу различить, падая внезапно в салон-вагоне поезда, произошла ли резкая остановка поезда, или же внезапно возникло равномерное силовое поле тяготения.

Полезно, однако, изменить наши представления о тяготении в самой их основе. Не будем больше смотреть на него, как на таинственное дальное действие, не будем искать резиденции этой силы в отдельных телах. Мы будем предполагать, что тяготение существует повсеместно в пространстве, что пространство—„поле“, поле тяготения. Тогда все наши предыдущие соображения можно выразить в такой форме: ускоренное движение так же относительно, как и прямолинейно-равномерное, оно эквивалентно покою, если только вместо движения предположить существование в пространстве силового поля. Короче: ускоренное движение и равномерное, постоянное силовое поле—эквивалентны. Это положение, установленное Эйнштейном, является краеугольным камнем теории относительности и носит название „принципа эквивалентности“. В течение веков физика смотрела на

равенство инертной и тяжелой массы просто, как на факт, и только теперь этот факт становится основой наших воззрений на природу.

13. Истинный характер понятия массы. Масса—род энергии. Выводы.

Обладает ли, однако, инертная масса неизблемостью и определенностью, необходимой для столь важного и руководящего понятия? Оказывается, что господство массы является далеко не всеобъемлющим, простираясь лишь на механические процессы. В физике существуют, однако, и другие обширные области тепловых, электрических, магнитных и световых явлений, не говоря уже о химических и жизненных процессах. В этих областях масса либо не играет вообще никакой роли, либо имеет сравнительно второстепенное значение. Свойства материи регулируются здесь не массой, а другими факторами, напр., своего рода „емкостями“, о которых мы уже говорили: проводимостью, излучением и т. д. Пока мы этим отвлекаться не будем, так как занимаемся еще областью механики.

Но возникает вот какой вопрос: является ли масса действительно чем-то прочным и неизменным? Вопрос может показаться странным, а спрашивающий—излишним скептиком. Рассмотрим, однако, дело поближе. Какую массу имеет покоящееся тело? Единственно правильный ответ—никакой. По меньшей мере мы не имеем никакой возможности что-нибудь сказать о ней, так как масса проявляется только при движении. Можно,

конечно, утверждать, что тело обладает тяжелой массой, а так как тяжелая масса равна инертной, то у тела, находящегося в покое, существует и инертная масса.

Но такое заключение не является прямым, по существу оно не касается инертной массы. Дальше, остается ли масса при движении неизменной? Остановимся на случае вращательного движения. Можно произвести опыт, сразу приближающий нас к ответу. Изготовим шар, состоящий из двух складывающихся латунных полушарий. Внутри полого шара поместим волчок, который по желанию можно запускать. До тех пор, пока волчок не вращается, мы можем перемещать и поворачивать шар, как нам заблагорассудится, преодолевая при этом всегда одно и то же сопротивление, соответствующее инерции массы шара и волчка. Но как только волчок внутри шара начнет вращаться, картина меняется; правда, перемещение шара и вращение его вокруг оси, соответствующей оси вращения волчка, сопровождается тем же сопротивлением, что и ранее, но все вращения шара вокруг других осей, в особенности же вокруг оси, перпендикулярной к оси вращения волчка, требуют необычайной затраты силы. Определяя, как раньше, массу, как противодействие изменению движения, мы можем сказать, что теперь масса шара увеличилась вследствие внутреннего вращения. Его масса стала сложной, слагаясь из статической и кинетической массы, при чем последняя тем больше, чем интенсивнее движение в системе. Можно было бы считать статическую массу „истинной“, кинетическую же „кажущейся“, но такого рода

обозначения могут привести к недоразумениям, так как по существу кинетическая масса столь же истинна, как и статическая. Наоборот, само собой напрашивается предположение, что статическая масса является следствием каких-то внутренних движений материи, которые нельзя наблюдать так непосредственно и просто, как мы наблюдаем вращение волчка внутри нашего шара. Эти заключения относятся к инертной массе, но она, как мы знаем, всегда равна тяготеющей массе. Следовательно, и тяготение должно зависеть от движений взаимодействующих тел, а потому закон тяготения Ньютона, в который, как мы видели, не входит время или зависящие от него величины скорости и ускорения, может быть только приближенным, хотя и выполняется с достаточной точностью в чрезвычайно широких пределах.

Итак, по крайней мере предварительно, мы можем утверждать, что масса—род энергии: чем больше энергии в теле, тем больше масса тела в истинном смысле понятия массы. Такой вывод—предварительный, так как мы еще не знаем, каковы количественные соотношения энергии и массы, т.-е. насколько именно увеличивается масса тела при определенном возрастании его энергии, мы не знаем переводного множителя от энергии к массе, и наоборот. Дело обстоит так же, как и при переводе времени в пространственные величины. Мы могли бы, конечно, в нашем опыте с волчком внутри шара вычислить и количественные соотношения, но эти вычисления имели бы только частное значение, существенное именно для данного опыта. Мы должны

вооружиться терпением и искать соотношение между массой и энергией в других областях.

На этом мы прекращаем на время рассмотрение механических явлений. Пересмотрим вкратце полученные результаты.

Абсолютного пространства и абсолютного положения в пространстве не существует, можно говорить только об относительных положениях. В некотором смысле можно говорить об абсолютном расстоянии между двумя точками, оно не меняется при замене одной системы отсчета другой. Момент имеет также только относительное значение, он имеет смысл только в отношении к другому моменту, с которого условно начинается отсчет времени, но промежуток времени (по крайней мере, предварительно) имеет абсолютный смысл; он не изменяется при перемене начального момента отсчета времени. Пространство обладает тремя измерениями, которые мы наглядно можем представить, но для абстрактного мышления время может рассматриваться как четвертое, равноправное измерение пространства. Остается невыясненным вопрос о переводном множителе между промежутком времени и пространственным отрезком. Скорость определена для любой покоящейся системы координат; она изменяется, однако, при переходе к движущимся осям координат. Ускорение инвариантно не только для всех неподвижных систем координат, но и для всех систем, обладающих прямолинейным и равномерным движением; оно имеет в этом смысле абсолютный характер и может быть выражено помощью силы, независимой от системы отсчета. Ускорение теряет

свою инвариантность и меняется при переходе к системам координат, обладающих ускорением друг относительно друга. Для отнесения силы к неподвижной системе отсчета нужно поэтому добавлять новую неизвестную силу. Существование материи проявляется, во-первых, силами, от нее исходящими (тяготение), и, во-вторых, инерцией, т.е. сопротивлением ускорению. Оба признака выражаются в понятии массы, тяжелой и инертной; при измерении в соответствующем масштабе обе массы равны между собою. Масса зависит от состояния движения, т.е. от энергии. Тем самым масса может рассматриваться, как форма энергии, но и здесь нам неизвестен пока переводный множитель между массой и энергией. В итоге мы имеем замкнутое в себе и определенное воззрение на мир механических явлений.

Теперь нам предстоит рассмотреть, насколько такое воззрение допустимо в областях, лежащих вне механики; не раздраживая понапрасну любопытства читателя, заметим теперь же, что наша механическая картина мира оказывается неверной при рассмотрении более тонких процессов природы, она должна быть изменена. Отсюда мы приходим к современной теории относительности.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ.

Физика эфира.

14. Звук и свет. Теория истечения. Аберрация неподвижных звезд. Опыт Араго.

Механика занимается движениями, т.-е. изменением положения тел со временем. В движении могут находиться твердые, неизменные системы; с другой стороны, существуют относительные перемещения отдельных частей системы при упругих изменениях твердых, жидких и газообразных тел. Но наряду с механическими явлениями есть целый ряд других: тепло, звук и свет, электричество и магнетизм; они проявляются своеобразными действиями, которые мы ощущаем частью непосредственно при помощи специальных органов чувств (кожа, ухо, глаз), частью же косвенным путем (для электричества и магнетизма и для большинства типов излучения мы не имеем особых органов чувств). Что представляют собою эти явления? Мы не можем, конечно, здесь достаточно подробно ответить на такой вопрос, и ограничимся только наиболее важным для нашей цели.

Звук находится в очень простом отношении к материи, и таким образом легко включается в

систему механических явлений. Поместим, напр., электрический звонок под колокол воздушного насоса. По мере выкачивания воздуха из-под колокола звон будет становиться все слабее и слабее и в конце концов перестает быть слышным; следовательно, звук передается воздухом, и легко показать, что сущность звука сводится к правильным волнообразным движениям частиц воздуха.

Но в распространении света воздух играет ничтожную роль; в этом легко убедиться на подобном же опыте с колоколом воздушного насоса. Еще яснее следует это из того обстоятельства, что свет распространяется в межзвездном пространстве, в котором нет воздуха или какого-либо другого вещества с обычными механическими свойствами. Возможны поэтому только три предположения: дальное действие, истечение или гипотеза колебаний. Гипотеза дального действия, ставящая свет в параллель с тяготением, несовместима с фактом конечной скорости распространения света. Эта скорость может быть определена очень точно из астрономических наблюдений (абберация света, затмения спутников Юпитера и т. д.), а также при помощи очень тонких лабораторных опытов (зубчатое колесо Физо, вращающееся зеркало Фуко и т. д.). Результат всегда один и тот же: 300.000 километров в секунду. Итак, остается выбор только между теорией истечения и волновой теорией света.

По теории истечения светящиеся тела испускают тончайшие световые частички, распространяющиеся по законам механики прямолинейно и равномерно в пространстве; колоссальная ско-

рость этих частиц стоит в непосредственной связи с необычайной малостью частиц. Эта теория, из которой в частности исходил Ньютон, дает простое объяснение целому ряду оптических явлений и потому могла держаться в течение многих веков. В частности, в вопросе, которым занимаемся мы, эта теория очень удобна, так как укладывается в рамки классической теории относительности. Фундаментальным фактом в этом отношении является то, что все оптические явления отражения, преломления света, светорассеяния и интерференции происходят на движущейся земле совершенно так же, как если бы земля находилась в абсолютном покое; при этом предполагается, что весь процесс разыгрывается на земле, и во всей системе от источника света до глаза наблюдателя не происходит никаких относительных перемещений отдельных частей. От этих последних условий мы пока откажемся и займемся, наоборот, рассмотрением таких световых явлений, где отдельные части системы имеют относительное перемещение. Такие случаи могут осуществиться различными способами: 1) источник света находится в покое (т.-е. он кажется нам покоящимся), наблюдатель же находится на движущейся системе; 2) источник света и наблюдатель находятся в покое, но промежуточная среда, в которой распространяется свет, движется; 3) наблюдатель и среда находятся в покое, источник света движется; 4) вся система, т.-е. источник света, среда и наблюдатель движутся относительно некоторой системы, считаемой неподвижной (напр., солнца). В сжатых рамках нашего изложения мы можем коснуться

только немногого; рассмотрим сначала явление aberrации света неподвижных звезд.

Пусть у нас имеется телескоп, предназначенный для наблюдения неподвижной звезды s . Для простоты выберем луч звезды, падающей перпендикулярно к направлению движения земли. Если бы земля находилась в покое, телескоп надо было бы установить по направлению луча, но земля продвигается вокруг солнца на тридцать километров в секунду, поэтому луч звезды через ничтожно малый промежуток времени вместо окуляра телескопа попал бы на боковую стенку трубы. Для того, чтобы луч шел все время по оси телескопа и попадал через окуляр в глаз, необходимо поставить трубу наискось; на рис. 6 изображены три последовательных положения наклоненного телескопа. Положение звезды мы

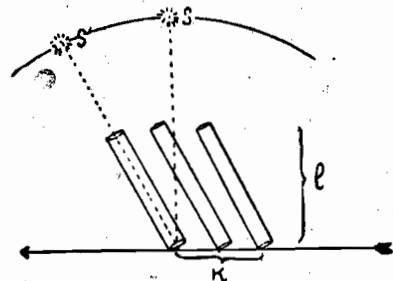


Рис. 6.

определяем по пересечению воображаемой небесной сферы с осью установленного на звезду телескопа, поэтому определяемое нами положение звезды s' будет отличаться от истинного

положения s . Величина этой ошибки в определении положения звезды будет, очевидно, измеряться отношением отрезка k , на который земля продвигается за время пробега луча от объектива телескопа к окуляру, к длине телескопа l , т.е. дробью $\frac{k}{l}$; оба отрезка пробегаются в одно время t соответственно землей и светом; если скорость движения земли v , а света c , то $k = vt$; $l = ct$, т.е.,

$$\frac{k}{l} = \frac{v}{c} = \frac{30 \text{ км.}}{300.000 \text{ км.}} = \frac{1}{10.000}$$

При переводе на угловые меры, в которых измеряется положение звезд на небесной сфере, это соответствует $\frac{1}{180}$ градуса. Такая величина может быть измерена с достаточной точностью и носит название угла аберрации. Итак, все обстоит благополучно: источник света в покое, наблюдатель движется; если скорость света известна, то из угла аберрации можно определить скорость движения наблюдателя; наоборот, если известна последняя скорость, можно найти скорость света.

Скорость света в материальной среде меньше, чем в пустоте, чем и объясняется преломление света. Фокусное расстояние линзы зависит от показателя преломления. Если мы наблюдаем в телескоп звезду, в данный момент летящую к земле, то относительная скорость частичек света увеличится по известному нам принципу сложения скоростей на величину скорости движения звезды. Если скорость света вне линз

телескопа изменилась, то должно измениться и фокусное расстояние телескопа, притом на величину, доступную измерению, как показывает вычисление. На этом основании Араго проделал ряд соответствующих астрономических наблюдений. Несмотря на тщательность постановки опыта, смещения фокусного расстояния не обнаружилось. Итак, эффект, вытекающий из теории, не обнаружен, результат опыта отрицательный. Заметим это, далее нам придется испытать целый ряд подобных разочарований.

15. Волновая теория света. Эфир. Покой и движение эфира. Эффект Доплера. Опыт Физо.

Так обстоит дело в теории истечения. Однако эта теория потерпела поражение и должна была уступить место волновой теории, когда было открыто явление интерференции. Если в некоторой точке пространства сходятся два луча, скажем, одинаковой яркости, то оказывается, что яркость освещения в этой точке не всегда равна двойной яркости, получаемой при освещении каждым лучем в отдельности. На опыте, вообще говоря, суммарное освещение меньше удвоенной яркости от каждого луча, а в предельном случае данная точка пространства при освещении двумя лучами остается совершенно темной. Если рассматривать свет как волновое движение, состоящее, картинно выражаясь, из последовательно чередующихся гор и долин, то явление становится сразу понятным. Если в данной точке пространства горы и долины одного луча совпадают

с горами и долинами другого, то яркость удваивается, если же, наоборот, горы одного луча приходятся как раз против долин другого—света совершенно не получается, данное место остается темным. Дело обстоит совершенно так же, как в случае водяных или звуковых волн, только в данном случае волны возникают не в воде и не в воздухе. Нам приходится ввести новую гипотетическую среду, чрезвычайно тонкую, наполняющую все мировое пространство и пронизывающую все тела,—эфир. Чрезвычайно неприятно, правда, что эфиру приходится приписывать самые странные свойства; несмотря на то, что он должен быть крайне легким и тонким, на него нельзя смотреть как на газ или жидкость, так как световые колебания не продольны, как звуковые волны в воздухе, состоящие из последовательных сгущений и разрежений, а поперечны, т. е. соответствуют изгибам среды перпендикулярно направлению луча. Это следует из явления поляризации света. Но поперечные волны возможны только в твердых телах; в газах и жидкостях они не могут распространяться. Таким образом эфиру, несмотря на его легкость и тонкость, приходится приписывать свойства твердого тела. Далее возникает следующий, особенно интересный для нас вопрос: остается ли эфир в покое при движении того вещества, которое он проникает, или же увлекается в движение? Если бы эфир оставался в покое при движении среды, то во всех оптических явлениях в движущихся средах можно было бы обнаружить наличие „эфирного ветра“, подобно тому как в быстро движущемся открытом автомобиле мы ощущаем

воздушный ветер; в обоих случаях ветер относительный, так как на самом деле движется, материя или автомобиль, а не эфир или воздух. Мы говорили пока только о крайних случаях полного покоя или полного увлечения эфира, на деле может происходить и частичное увлечение, подобно тому как слои воздуха около автомобиля несколько вовлекаются в движение, ближайшие слои увлекаются сильнее, более удаленные—слабее, наконец в большом удалении совершенно незаметно движения воздуха. Предположение о неподвижности эфира связано с очень существенным затруднением: относительно чего же эфир покоится? Выбор земли или солнца в качестве системы координат, очевидно, неудобен, так как они обладают собственными движениями; остается только „абсолютное пространство“, но для нас его не существует. Следовательно, абсолютно покоящийся эфир не имеет никакого определенного смысла.

Рассмотрим некоторые из тех многочисленных наблюдений и опытов, которые производились с целью изучения свойств эфира. Уже явление аберрации, столь просто объяснявшееся в теории истечения, представляет затруднения в волновой теории света.

Причина затруднений в том, что свет при измерении аберрации проходит не только через пустое пространство, но и через вещество, т. е. линзы телескопа и глаза. Таким образом вопрос сводится к тому, как ведет себя эфир в движущейся материи. Французский оптик Френель, один из главных основателей волновой теории, показал, что аберрация может быть объяснена только

в том случае, если отказаться от обоих крайних предположений о покоящемся и вполне увлекаемом материей эфире и предположить только частичное увлечение эфира, характеризуемое особым „коэффициентом увлечения“, меняющимся от вещества к веществу. Как мы знаем, скорость света в различных средах различна, отношение скорости света в пустоте к скорости света в среде есть показатель преломления n . Коэффициент увлечения определяется именно показателем преломления. По Френелю

$$k = \frac{v^1}{v} = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right).$$

Для воды $n = \frac{4}{3}$ и коэффициент увлечения $k = \frac{7}{16}$, для среднего стекла $n = \frac{3}{2}$, $k = \frac{5}{9}$. Таким способом явление аберрации укладывается в волновую теорию света, но способ кажется очень искусственным и тем более, что показатель преломления для различных цветов различен, различен следовательно и коэффициент увлечения; выходит так, как будто для каждого цвета должен существовать свой особый эфир!

Отрицательный результат опыта Араго объясняется также частичным увлечением эфира.

Перейдем теперь к другому чрезвычайно интересному явлению, эффекту Доплера. Этот эффект наблюдается при всякого рода волнообразных движениях, если только источник волнения и наблюдатель обладают скоростью друг относительно друга в направлении их соединяющей прямой. Волны, так сказать, теснят одна другую при приближении источника к наблюдателю или

наблюдателя к источнику; наоборот, волны как бы отстают одна от другой при удалении источника от наблюдателя. Следствием этого в звуковых явлениях будет повышение тона при приближении и понижение при удалении источника звука от наблюдателя. Это легко наблюдать при проходе мимо нас гудящего паровоза.

Если скорость звука c , а относительная скорость наблюдателя и источника звука v , то высота тона меняется в отношении

$$\frac{1}{1 \pm \frac{v}{c}}$$

при чем знак $+$ относится к случаю сближения источника и наблюдателя, знак $-$ к случаю удаления. В световых явлениях наблюдается то же самое; изменению высоты тона соответствует изменение цветности луча; покоящийся желтый источник света при удалении от наблюдателя покажется несколько краснее, при приближении, наоборот, — зеленее. Для наблюдения этого явления нужно, чтобы свет был однородным, т.-е. строго одноцветным, и кроме того источник должен двигаться с большою скоростью для того, чтобы величина $\frac{v}{c}$ не была слишком мала.

Одноцветность достигается разложением света источника в спектр, большая скорость — выбором соответствующих звезд в качестве источника света. Но в связи с вопросом об эфире и в этом случае возникают затруднения; явление, как оказывается, должно зависеть от того, как движутся источник и наблюдатель относительно эфира;

явление не вполне еще определяется относительной скоростью наблюдателя и источника, как в области механических явлений. Простой расчет показывает, что нужно различать тот случай, когда наблюдатель находится в покое относительно эфира, а источник движется, и случай покоя источника и движения наблюдателя. В первом случае новая частота колебаний ν_1 выражается через нормальную частоту колебаний ν так:

$$\nu_1 = \nu \left(1 \pm \frac{v}{c} \right),$$

а во втором так:

$$\nu_2 = \frac{\nu}{1 \pm \frac{v}{c}}$$

Обозначим:

$$\frac{v}{c} = b$$

Выражение для ν_2 можно представить в виде бесконечного ряда

$$\nu_2 = \nu (1 + b + b^2 + b^3 + \dots).$$

С другой стороны

$$\nu_1 = \nu (1 + b).$$

Если b очень малая дробь (для случая движения земли $b = \frac{30}{300.000} = \frac{1}{10.000}$), то выражения для ν_1 и ν_2 приблизительно равны, так как все члены, начиная с b^2 , необычайно малы; результат совпадает до членов второго порядка. Заметим это,

так как подобное же расхождение в членах, начиная со второго порядка, т.-е. с b^2 , мы увидим и в других оптических явлениях.

Следовательно, вывод, к которому мы приходим, таков: если пренебречь членами второго порядка, то эффект Доплера будет зависеть только от относительной скорости наблюдателя и источника; если же принять во внимание члены второго порядка, то явление будет зависеть и от движения относительно эфира.

В эффекте Доплера речь идет только о движении источника или наблюдателя. Мы рассмотрим теперь очень важный опыт Физо, в котором движется сама среда, в которой распространяется свет. Для этой цели нужно пользоваться, конечно, только прозрачными средами, каковы, напр., вода и воздух. Опыт был поставлен так (рис. 7): свет от источника q попал на слегка посеребренную полупрозрачную пластинку p , наклоненную под углом в 45° к лучу. Здесь луч распадался на два, один отражался от пластинки p в зеркало s_1 , откуда, пройдя два раза через стеклянную трубку, как изображено на рисунке 7, при помощи зеркал s_2 и s_3 снова попадал на пластинку p , откуда отражался в зрительную трубу f ; другая часть света от источника q проходила через пластинку p , пробегала два раза через согнутую стеклянную трубку и при помощи зеркала s_1 вновь проходила сквозь пластинку p , попадая в зрительную трубу f . Оба луча пробегали путь одной и той же длины $p s_3 s_2 s_1 p$, но только в противоположных направлениях. Если оба луча распространяются на всем пути с одинаковой скоростью, то при рас-

смотрении в трубу f мы увидим вообще некоторую интерференционную картину (полосы), определяемую только разностью длин путей.

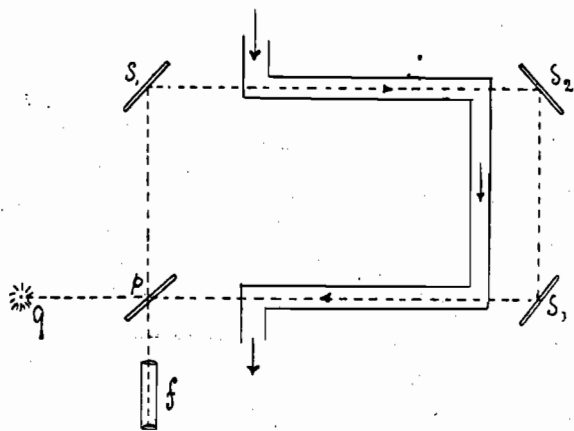


Рис. 7.

При пропускании через коленчатую трубку быстрого тока воды, Физо нашел, что интерференционные полосы смещались и тем больше, чем больше была скорость водяного потока. Наблюдавшееся при этом смещение полос соответствовало почти точно тому частичному увлечению эфира, которое следует из рассмотренной выше теории абберации Френеля.

16. Опыт Майкельсона. Результат. Гипотеза сжатия Лорентца.

Все описанные опыты и наблюдения могут быть приведены в согласие с теорией эфира, хотя довольно искусственным образом и не без внутренних разногласий. Теперь, однако, перейдем к такому опыту, который стоит в самом резком противоречии с теорией, и потому приобрел особую известность. Он стал исходным пунктом современной теории относительности, по существу отличающейся от классической теории. Впервые опыт был сделан в 1881 г. американцем Майкельсоном и впоследствии повторен еще с большей точностью им же вместе с Морлеем. Движущимся телом и на этот раз является земля. Для понимания и соответствующей оценки опыта нам нужно несколько подготовиться. Для измерения скорости на земле проще всего, казалось бы, взять сильный источник света (напр., прожектор), послать от него свет на несколько десятков километров (что легко осуществимо с современными прожекторами) и только сравнить время посылки светового сигнала со временем его прибытия на приемную станцию; таким способом, напр., легко определяется скорость звука. Но скорость света столь велика, что даже расстояние в 30 километров пробегается в $\frac{1}{10.000}$ секунды. В случае применимости в данном опыте принципа сложения скоростей, вследствие движения земли эта ничтожная величина могла бы измениться только

на $\frac{1}{100.000.000}$ секунды. Измерять такие промежутки времени мы не в состоянии, а потому и весь наш примитивный опыт безнадежен. Поэтому пришлось обратиться к тем искусственным способам измерения скорости света, о которых мы уже упоминали выше. Во всех этих способах для возможно большего увеличения длины пробегаемого пути свет отражают от зеркала и заставляют вновь возвращаться.

Опыты производятся на движущейся вокруг солнца земле. Если направление светового потока совпадает с направлением движения земли, то мы должны предполагать, что ему требуется большее время для достижения зеркала, которое убегает вместе с землею, чем в том случае, если бы земля находилась в покое; на обратном пути, наоборот, свет скорее встретит движущегося к нему навстречу наблюдателя. С первого взгляда может показаться, что запаздывание на пути к зеркалу и ускорение на обратном пути как раз компенсирует друг друга, и наблюдатель ничего особенного не заметит. Но это неверно, появляется разница, и на этот раз — второго порядка. Чтобы убедиться в этом, вспомним, что скорость есть пройденный путь, деленный на время:

$$c = \frac{s}{t}$$

или

$$t = \frac{s}{c}.$$

В нашем случае проходится двойной путь, туда и обратно, следовательно

$$t = \frac{2s}{c}.$$

Применим теперь принцип сложения скоростей, обозначив скорость движения земли через v ; в таком случае время прохождения света на прямом пути от наблюдателя к зеркалу будет:

$$t_1 = \frac{s}{c - v}$$

и на обратном пути

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

в сумме:

$$T = t_1 + t_2 = \frac{s}{c - v} + \frac{s}{c + v}$$

После небольших алгебраических преобразований находим:

$$T = \frac{2s}{c} = \frac{t}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Таким образом T больше, чем t ; разница выражается членами второго порядка; она столь мала, что обычные методы измерения скорости света Физо и Фуко в данном случае совершенно неприменимы. Достаточной чувствительностью обладает только метод интерференции,

о котором мы уже говорили; для наблюдения при помощи этого метода два луча, прошедшие различными путями, должны сойтись в пункте наблюдения.

Майкельсон достигает этого тем, что наряду с лучом, распространяющимся по направлению движения земли и обратно, получает луч, пробегающий перпендикулярно к направлению движения земли; оба луча получаются от одного и того же источника и сходятся в глазу наблюдателя. Установка ясна из рис. 8. 2,—источ-

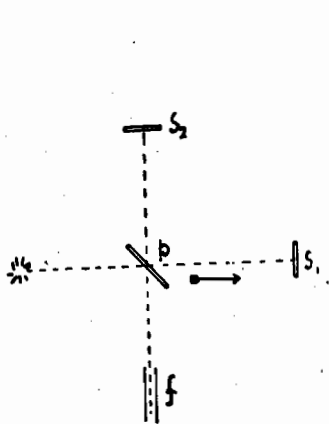


Рис. 8.

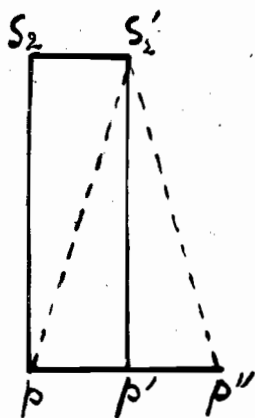


Рис. 9.

v

бою. Из рис. 8 еще не ясен ход лучей при движении земли. Ход лучей изображен на рис. 9. Луч, пробегающий вдоль направления движения земли, остается все время на одной прямой, буквы *p* и *s1* на рис. 9*a* относятся к моменту отхода свето-

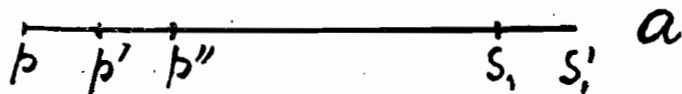


Рис. 9*a*.

вого сигнала, буквы *p'* и *s1'* соответствуют моменту прибытия светового сигнала к зеркалу *s1*, на конец *p''* соответствует моменту возвращения сигнала к пластинке *p*; результат у нас уже вычислен выше. Луч, перпендикулярный к направлению движения земли, ведет себя совершенно иначе (рис. 9*b*); вследствие движения земли луч идет к зеркалу по пути *ps2'* и обратно по пути *s2p''*; по теореме Пифагора легко вычислить длину пути:

$$(ps_2')^2 = (ps_2)^2 + (s_2s_2')^2;$$

но $ps_2 = s$, с другой стороны

$$ps_2' = ct_1$$

$$s_2s_2' = vt_1$$

Подставляя в предыдущее равенство, находим:

$$c^2t_1^2 = s^2 + v^2t_1^2$$

ник света, *p*—уже знакомая нам слегка посе-ребренная, полупрозрачная пластинка, наклоненная под углом 45° к лучу, *s1*, *s2*—зеркала, *f*—зрительная труба, отрезки *ps1* и *ps2* равны между со-

Откуда находим

$$t_1 = \frac{s}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-b^2}}.$$

Путь $s_2'p''$ равен $s_2'p$, равны и соответствующие времена пробега. Таким образом все время пробега туда и обратно

$$T = \frac{2s}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} = \frac{t}{\sqrt{1-b^2}}.$$

Для времени прямого и обратного пробега по направлению движения земли мы уже нашли, что

$$T = \frac{t}{1-b^2};$$

времена, следовательно, различны. Обозначим разницу через ΔT , тогда

$$\Delta T = \frac{t}{1-b^2} - \frac{t}{\sqrt{1-b^2}}.$$

Приблизительно, с точностью до величин второго порядка:

$$\Delta T = t(1+b^2) - t\left(1 + \frac{1}{2}b^2\right) = t \cdot \frac{b^2}{2},$$

т.е. разница опять определяется второй степенью величины b . Но в данном случае можно применить метод интерференции, и Майкельсон разработал его с таким поразительным искусством, что величины второго порядка могли еще измеряться достаточно точно. Аппарат устана-

вливался то одним, то другим плечом в направлении движения земли, при этом интерференционные полосы должны были смещаться вправо или влево, при чем величина этого смещения должна быть столь значительной, что уже сотая часть смещения могла быть замечена. Результат был, однако, совершенно отрицательным—никого смещения не наблюдалось:

$$\Delta T = 0.$$

Итак, эфир как будто совершенно увлекается, незаметно никаких следов „эфирного ветра“ даже в величинах второго порядка. Скорость света независима от движения земли, нет возможности отличить движущуюся систему от покоящейся. Выражаясь определеннее, можно сказать, что принцип сложения скоростей не оправдывается: скорость света не увеличивается и не уменьшается на величину скорости движения среды, она остается постоянной. Скорость света оказывается абсолютным инвариантом, или универсальной постоянной природы. Надо ясно вдуматься в этот результат и понять, что он равносителен крушению всех основных правил нашего расчета. Рассуждая, с одной стороны, чисто логически, с другой же, принимая во внимание результат опыта, мы приходим к уравнениям, противоречащим себе самим:

$$c + v = c; \quad c - v = c!$$

Но это противоречие возникает только для скорости света и эфира. Соответствующий опыт со звуком и воздухом дал бы положительный

результат, совершенно согласный с принципом сложения скоростей. Следовательно, суть дела лежит в каких-то противоречиях, относящихся только к свету и эфиру, и наша задача—вскрыть эти противоречия.

Первая очень важная и остроумная, но все же неудовлетворительная попытка объяснения результата опыта Майкельсона была сделана выдающимся голландским теоретиком Лорентцом. Лорентц рассуждает так: если вычисление не согласуется с опытом, то нужно сделать какие-нибудь новые предположения относительно величин, входящих в вычисления, хотя бы вычисления и казались совершенно бесспорными; ничто на свете не может рассматриваться как бесспорное и „самоочевидное“. У Лорентца не хватило смелости посягнуть на старое воззрение о пространстве и времени, материи и энергии, поэтому оставался единственный выход: пути, по которым пробегает свет в опыте Майкельсона в направлении, параллельном и перпендикулярном движению земли, не равны между собою, т.-е., $ps_2 \neq ps_1$. Однако прибор построен так, что $ps_1 = ps_2$, в чем удостоверялись измерением при помощи соответствующего масштаба, при чем оба колена прибора были измерены одним и тем же масштабом; поэтому в данном отношении не может быть, повидимому, никаких сомнений. Но сомнение—душа новых достижений; поэтому Лорентц высказал следующую смелую гипотезу: масштаб, из какого бы вещества он ни был сделан, из стали или дерева, не сохраняет одну и ту же длину в различных направлениях к движению

земли. В направлении перпендикулярном к движению земли масштаб остается тем же, что и в случае покоя. Иначе обстоит дело в направлении, параллельном к движению: здесь длина масштаба меняется, наши формулы дают определенный ответ, когда произойдет удлинение и когда укорачивание масштаба и в какой именно мере. В этих формулах мы предпологали, что пути одинаковы, различны времена T , на самом же деле, как показывает отсутствие смещения интерференционных полос, времена T для обеих лучей одинаковы, различны пути; отношение путей должно быть равно $\sqrt{1-b^2}$. В этом заключается „гипотеза сокращения“ Лорентца. Всякое тело, движущееся относительно эфира со скоростью v , сокращается в направлении движения на величину $\frac{b^2}{2}$, где

$$b = \frac{v}{c};$$

в случае движения земли $b = \frac{1}{10.000}$, и длина поэтому сокращается всего на $\frac{1}{200.000.000}$ своей первоначальной величины; чем больше v , тем больше сокращение, если бы $v = c$, то тело сжалось бы в точку. Масштаб таким образом сокращается, шар сплющивается (для земли это сплющивание равно всего 6 см.); если бы скорость его движения равнялась скорости света, то шар превратился бы в диск.

Можно спросить себя, какой же смысл этой гипотезы; удовлетворительного ответа на этот вопрос не существует. Мы знаем, правда, случаи, когда тела сокращаются, напр., под действием упругих или магнитных сил, но в опыте Майкельсона такие силы отсутствуют; даже привлечение внутренних электрических натяжений, необходимость существования которых вытекает из новых воззрений на природу электричества, не приводит к определенному ответу. Остается, следовательно, предположить, что движение, как таковое, т.-е. чистый процесс инерции, вызывает сокращение, хотя, как мы видим, инерционное, прямолинейно-равномерное движение как раз характеризуется тем, что длины и фигуры тел должны оставаться неизменными. Гипотеза не имеет, таким образом, внутреннего смысла, она придумана только для согласования теории с опытом Майкельсона. Стал ли понятнее результат этого опыта от того, что мы свели его к непонятной самой по себе гипотезе? Конечно, нет. Над нами совершается своего рода насилие. Один изверг древности обрубал ноги своим гостям, если гости оказывались слишком длинными по сравнению с длиной его кровати; мы поступаем несколько милосерднее, сжимаем масштаб так, чтобы он уложился куда следует, но по существу дело сводится все-таки к истории с Прокрустовым ложем.

Если спросить себя далее, является ли однако такое сжатие фактом, то ответ может быть только один: доказать этого нельзя, так как любой масштаб, которым мы вздумали бы мерить сжатие, сжимается в свою очередь и со-

вершенно в равной мере. Все остается очень темным и неудовлетворительным, поэтому мы охотно прислушиваемся и к другим объяснениям. Очень интересно отметить, оглядываясь на всю историю вопроса, что Лорентц был чрезвычайно близок к тому, чтобы вполне выручить физику из беды. Но он не дошел до цели, так как не решился отказаться от идеи эфира и абсолютного пространства и времени. Он — только предтеча истинного спасителя, имя которого Эйнштейн.

Мы могли бы рассмотреть еще целый ряд опытов оптического и электрического характера, приводящих к тому же результату, что и опыт Майкельсона, т.-е. доказывающих невозможность обнаружения движения земли относительно эфира. Делать этого мы не будем и воспользуемся только случаем для некоторого изменения теории света и связанной с ней физики эфира.

17. Скорость и распространение волн. Электромагнитная теория света. Польза и вред эфира.

По многим основательным причинам мы высказались против теории дальнего действия и теории истечения и приняли волновую теорию света. Мы считали причиной световых явлений колебания эфира; сам эфир по существу неподвижен или только частично вовлекается в движение движущейся материальной средой, подобно тому, как воздух при распространении звуковых колебаний совершает только небольшие

колебательные движения или частично вовлекается в движение при ветре. В звуковых явлениях—колебания упругие, поэтому и эфиру приписывали упругие свойства. Такое предположение натолкнулось, однако, со временем на ряд противоречий и затруднений. Но существуют волны совершенно иного рода—электрические волны, возникающие и распространяющиеся с большей или меньшей силой вокруг проводников, в которых происходят электрические колебания. Простейшим типом таких колебаний является всем известный переменный городской ток с числом перемен 50 раз в секунду, которым питаются осветительные лампочки. При разряде заряженного конденсатора, напр., лейденской банки, через достаточно длинную проволоку можно получить чрезвычайно частые колебания, в миллион и более раз в секунду. Всякое изменение электрического тока сопровождается, как известно, изменением магнитного поля вокруг проводника и обратно; поэтому электрические колебания правильнее назвать электро-магнитными, так как те и другие колебания совершенно неразделимы. Герцу удалось доказать, что вокруг проводников, в которых происходят электрические колебания, в окружающей среде распространяются электро-магнитные волны, подобно тому как вокруг колеблющегося камертона распространяются звуковые волны. Герц доказал, что воздух имеет ничтожное влияние на распространение электро-магнитных волн, в пустоте они распространяются так же, как и в воздухе, при чем скорость распространения равна 300.000 километров в секунду, т.е. равна скорости света. Эти волны,

подобно световым, отражаются от больших зеркал, преломляются через большие призмы и т. д. Встречая на своем пути электрический проводник, способный совершать электрические колебания, электро-магнитные волны возбуждают колебания в проводнике по законам резонанса. Маркони нашел простой способ увеличить излучение колеблющейся электрической системы, снабдив ее открытыми воздушными проводниками, так называемой „антенной“. Изобретение Маркони послужило началом телеграфии без проводов со всеми ее изумительными успехами.

Совпадение скорости распространения электро-магнитных волн со скоростью света, а также аналогия и в других свойствах приводят к естественному предположению, что и световые волны также представляют собою не что иное, как волны электро-магнитные. Отличие их от волн переменного тока и волн радиотелеграфии только в том, что они значительно короче. Такое предположение лежит в основе общепринятой в настоящее время электро-магнитной теории света, созданной Фарадеем, Максвеллом и Герцем. Носителем электро-магнитных волн стали считать тот же светоносный эфир. Таким образом наряду с механической физикой возникла физика эфира.

В наше время эфир, которому физика столь многими обязана, оказывается неудобным, ведет себя неподобающим образом: то он покоится, то в большей или меньшей степени вовлекается в движение, притом в различных случаях в различной мере, для длинных электро-магнитных волн так, для коротких световых иначе и т. д.

И самое важное — он не подчиняется законам механики, нарушает принцип сложения скоростей. Существование его нельзя примирить с постоянством скорости света в движущейся и покоящейся среде. Не лучше ли отказаться от эфира: мавр сделал свое дело, мавр может удалиться. Но кем же его заменить? Заменяя эфир другой реальностью, не попадем ли мы из огня в полымя. Мы оказываемся в положении хозяйки, уже неоднократно менявшей прислугу, но получавшей от этого только возрастающее озлобление. Хозяйка в конце концов приходит к решению: не надо мне никакой прислуги, буду делать все сама. Это очень хорошо и решительно, но чему соответствует такое решение в нашем случае?

И ученый, и неученый человек любят наглядность, она наиболее способствует пониманию и наиболее удовлетворяет. Это очевидно во всех тех случаях, когда наглядность возможна, где дело идет о „картинах“, безразлично, будут ли то картины для глаза, уха, осязания, ощущения тепла, запаха или вкуса. Но даже и там, где наглядность в действительности отсутствует — человек старается себе ее создать, изобретая картины невозпроизводимых предметов и событий. Докзательство тому, напр., попытки экспрессионистов в искусстве, или язык любого народа. Эфир — такая же картина. С большими натяжками, как мы уже видели, его можно представлять себе субстанцией или средой, где разыгрываются явления, объяснить которые существованием одной материи невозможно. Но нет ли у нас более простой картины для этих явле-

ний, и притом действительной картины? Я думаю, что есть. Это — основа всякого познания и представления — пространство. Почему не воспользоваться самим пространством, как картиной и носителем явлений, притом всех явлений — как механических, так и „эфирных“? Не делалось этого потому, что питали страх к священному понятию пространства, воспринятому из философии, и потому не решались злоупотреблять им в области физики. Позволительно, однако, выразить сомнение, можно ли считать злоупотреблением перенесение чего-либо из абстрактного царства формы в действительный мир? Итак, займемся „обмирщением“ пространства, сделаем его носителем вещей и событий, и эфир нам больше не понадобится. Конечно, здесь предмет раздора между приверженцами субстанциальных картин, с одной стороны, и любителями отвлеченности — с другой. Первым не по душе пространство, как что-то действительное; они говорят, что мертвое пространство не может быть носителем живых событий. Но это — недоразумение. Пространство стало из философского образа физическим, оно уже не мертвое, а живое. Такое живое пространство, пронизываемое силами, мы уже назвали „полем“; главными представителями таких полей являются поле тяготения для движения масс и электромагнитное поле для „излучения“. Правда, такая двойственность не совсем отвечает нашим стремлениям, для нас было бы приятнее иметь одно единственное поле, определяющее все явления природы. Но кто знает, может быть, и такое обобщение удастся.

18. Истинный смысл пространства и времени Масштабы и часы. Марширующая колонна. Световые сигналы.

Пространство для нас теперь нечто чрезвычайно реальное, физическое. Но как же обстоит, однако, дело с другой „формой“ нашего восприятия—временем? Рассматривая механические явления, мы уже связали пространство и время в одно четырехмерное множество, в котором время играет такую же роль, как и каждая из трех пространственных координат. Затруднение было только в том, что для пространства и времени мы должны были применять различные измерительные приборы, для пространственных отрезков—масштабы, для времени—часы. Когда мы применяем принцип сложения скоростей, то предполагаем, что в движущейся и покоящейся системе измерения производятся теми же мерами, т.-е. единица длины и единица времени остаются неизменными в обеих системах. Опыт показывает, однако, что принцип сложения скоростей не выполняется, что скорость света в обеих системах имеет одну и ту же величину. Отсюда неизбежно заключение, что единицы длины и времени различны в обеих системах. Таким образом нет абсолютных масштабов и часов, пространственные и временные отрезки—только относительные понятия и различны в различных системах; притом ни одна система не играет преимущественной роли, вроде, напр., „абсолютно покоящейся“ системы: все системы равноправны, в каждой системе ее масштабы и часы должны рассматриваться, как верные, а

масштабы и часы других систем—как неверные. Пусть для наглядности наши масштабы будут обыкновенными деревянными линейками, а часы—обыкновенными пружинными часами.

Допустим, что произошло некоторое событие, разыгравшееся в определенном месте. Моменты начала и конца события мы можем определить при помощи часов. Оба момента, как мы уже знаем, относительны; вычитая одну величину из другой, находим длительность события, имеющую абсолютный характер. Мы предполагаем только, что начало события и начальное положение стрелки часов были „одновременны“, то же самое и относительно конца события. В данном случае одновременность очевидна. Как, однако, определить одновременность двух событий, происходящих в двух различных местах? Если оба пункта находятся в той же самой покоящейся системе, задача разрешается просто и в этом случае. В обоих пунктах A и B мы ставим часы, заранее сверенные и с одинаково поставленными стрелками. В момент события в пункте A мы забираем часы с собою и идем в пункт B , затратив на дорогу время t . Нам говорят там, что после события прошло как раз t —секунд, события в A и B произошли, следовательно, одновременно. Но что делать, если вся система движется прямолинейно и равномерно? Мы рассмотрим для этой цели довольно сложный случай, имеющий, однако, то преимущество, что он даст нам механическую модель опыта Майкельсона.

Военный отряд в походе. В центре—главные силы, впереди, сзади и по сторонам—стороже-

вые охранения на расстоянии 20 километров от центра. Вся группа стоит на месте. Вестовой, несущий донесения или приказы, проходит по 5 километров в час, т.-е. находится в дороге от центра к сторожевому охранению в течение 4 часов. Если из центра сразу отправляются четыре вестовых по всем направлениям вперед, назад, налево и направо и обратно, то через восемь часов все они одновременно вернуться в штаб отряда. Отмечая момент прихода вестовых, сторожевые охранения могут сверить свои часы со штабными. Если вся колонна начинает двигаться со скоростью 3 километров в час, то картина меняется: вестовой, направляющийся к передовому сторожевому охранению, приближается к нему только на 2 километра в час, т.-е. потребуется 10 часов для доставления приказа, зато на обратном пути вестовой станет приближаться к штабу со скоростью 8 километров в час и употребит на дорогу всего $2\frac{1}{2}$ часа; всего, следовательно, потребовалось $12\frac{1}{2}$ часов (вместо прежних 8 часов). Столько же времени потребуется на дорогу и вестовому, направляющемуся к заднему сторожевому охранению и обратно. Вестовой, направляющийся влево, также запоздает; желая достичь бокового сторожевого охранения по кратчайшей прямой линии, он должен двигаться по диагонали; по теореме Пифагора легко вычислить, что ему потребуется для возвращения в штаб отряда 10 часов. Для того, чтобы все вестовые, одновременно вышедшие из штаба, одновременно и вернулись, необходимо приблизить передовой и задний отряды к центру с расстояния в 20 километров

на расстояние 16 километров; тогда на путешествие в один конец вестовой употребит 8 часов, в другой—2 часа, всего 10 часов, т.-е. столько же, сколько и в боковых отрядах. Предположим, что именно так и сделано. Как же быть, однако, при таких условиях со счетом времени? Все зависит от того, как ставить часы. В боковых отрядах вопрос решается просто. Вестовой указывает время отбытия из штаба, к этому времени прибавляется 5 часов, и таким образом получается правильное время. В передовом и заднем отряде можно бы поступить так же, т.-е. прибавить ко времени отбытия вестового из штаба 8 часов и получить таким образом, так сказать, абсолютное время. Но пусть существует общий для всех отрядов приказ командующего прибавлять ко времени отбытия вестового из штаба только 5 часов; получится относительное время, отстающее у передового и тылового отряда на 3 часа сравнительно со временем боковых отрядов. Если все вестовые вышли из штаба, напр., ровно в полдень, то при указанной регулировке часов ровно в 5 часов пополудни они будут во всех отрядах и в 10 одновременно воротятся в штаб. Получится таким образом видимость того, что каждый вестовой потратил равное время на путь туда и обратно, принцип сложения скоростей как бы исключается, все происходит так же, как если бы отряд стоял на привале; это достигнуто, однако, двумя существенными мерами. Прежде всего расстояние передового и тылового отряда от штаба стало меньше, далее, вместо четырех часов пути стало пять, т.-е. часы пошли медленнее. (Мы предоставляем самому чи-

тателю убедиться, что и вестовым, передвигающимся между сторожевыми охранениями, будет казаться, что отряд стоит на месте). Все это значит, что исключение принципа сложения скоростей равносильно совершенно новой интерпретации пространства и времени. Отрезки и промежутки времени теряют абсолютное значение и зависят от состояния движения, при чем отрезки укорачиваются в том же отношении, в каком времена возрастают. В нашем примере принцип сложения скоростей был нарушен насильственно, но если мы заменим вестовых лучами света, то, как мы уже знаем, принцип сложения фактически теряет силу. Отсюда автоматически следует, что пространственные и временные величины видоизменяются в данном случае указанным образом.

Итак, перейдем теперь от механических вестовых к световым сигналам. Пусть существуют

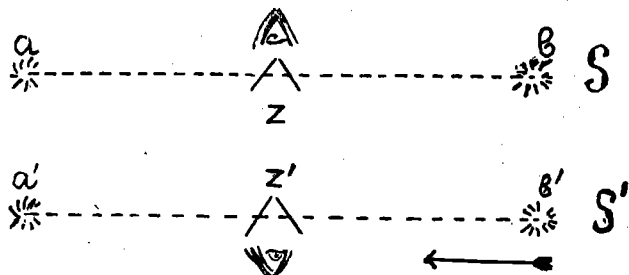


Рис. 10.

две точки a и b (рис. 10); посредине между ними, в точке z , помещены два полупрозрачных зеркала под углом в 45° к линии ab , так что на-

блюдатель в точке z может наблюдать за световыми сигналами, исходящими от a и b , не препятствуя их распространению. В a и b тоже расположились наблюдатели с часами и поставили себе задачей установить часы так, чтобы показания стрелок часов в обоих пунктах в один и тот же момент времени были одинаковы. Очевидно, только таким способом можно установить одновременность событий, происходящих в различных местах. Для этой цели я, находясь в z , поручаю моим ассистентам в a и b в тот момент, когда их часы будут стоять ровно на 12, послать световой сигнал; если оба сигнала из a и b придут ко мне в z одновременно, то часы идут верно, в противном случае—одни из часов нужно соответственно переставить. Разумеется, что для достаточной чувствительности такого способа потребуются чудовищные расстояния, которые бы свет проходил в течение многих минут или часов. Но для простоты выберем сравнительно короткое расстояние между a и b в 300.000 километров, которое свет пройдет в 1 секунду. Мы со всей нашей установкой находимся на какой-нибудь системе S , пусть, однако, есть какая-нибудь другая система S' , движущаяся по отношению к первой прямолинейно и равномерно со скоростью 100.000 километров в секунду. В этой второй системе производятся такие же опыты, как и в системе S . То обстоятельство, что системы движутся друг относительно друга, не имеет для каждой из них никакого значения. Я с моими ассистентами произвожу наблюдения в системе S , другой наблюдатель в системе S' , при чем я считаю S систе-

мой покоящейся, а наблюдатель в S' с таким же правом считает неподвижной свою установку; он думает, что движусь я, я думаю, что движется он. И я, и другой наблюдатель хотим достичь того, чтобы наблюдать и через чужие зеркала. Это возможно в тот момент, когда обе точки z и z' находятся как раз одна против другой. Спрашивается, в какой же момент в этом случае должны послаться сигналы из a' и b' , чтобы я увидел их одновременно в зеркалах z' ? Если сигналы из обоих пунктов a' и b' будут посланы одновременно, то, очевидно, я не увижу их сразу в зеркалах z' , так как в силу движения системы S' со скоростью 100.000 километров правый сигнал придет на $1/3$ секунды после левого сигнала. Наблюдатель в S' , смотря в мои зеркала z , наоборот, найдет, что правый сигнал придет на $1/3$ секунды скорее левого. Коротче, одновременное в одной системе — разновременное в другой, движущейся прямолинейно и равномерно по отношению к первой. Одновременность не абсолютное, а относительное понятие. То же самое можно утверждать и в отношении промежутка времени, определяемого одновременностью одной пары моментов в сравнении с другою парюю.

Все такие „мысленные опыты“, нужно сознаться, страдают многими недостатками; в нашем опыте, напр., можно заглянуть в зеркало чужой системы только на одно мгновение. То же самое и еще в большей мере приходится сказать о многочисленных „моделях“, выполненных с помощью линеек, часов и движущихся механизмов для иллюстрации относительности от-

резков, моментов и промежутков времени. Для вдумчивого читателя все это излишне; он поймет и без этих ухищрений основной вывод. Бдльшую определенность и ясность этот вывод получит при точном рассмотрении, к которому мы теперь приступаем. Разумеется, математика при этом неизбежна, но она столь преста и прозрачна, что даже мало подготовленный читатель сможет получить хотя бы общее представление о сути дела.

19. Пространственно-временная картина мира. Специальная теория относительности. Отношение пространственных и временных отрезков.

Преобразование Галилея, определяющее переход от системы S к системе S' , движущейся равномерно и прямолинейно со скоростью v относительно S' , выражается, как мы уже видели в первой части, такими уравнениями:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\ t' &= t\end{aligned}$$

(мы опускаем мало интересные для нас координаты y и z). В этом преобразовании характерно, что время остается неизменным, меняются только пространственные координаты, пространство становится относительным, а время сохраняет свой абсолютный характер. С нашей новой точки зрения это неверно, так как место не существует вне времени и время вне места; если относительно одно, то относительно и другое, при чем законы, определяющие эту относительность, со-

держатся в принципах относительности и постоянства скорости света.

Мы уже относили один раз события, протекающие в пространственной одномерной системе, к координатам покоящейся системы, ось x —ов которой направлена вправо, а ось t перпендикулярно вверх. Если мы отнесем события к системе координат, движущейся равномерно и прямолинейно, то ось t несколько наклонится к оси x —ов. Пусть обе сравниваемые системы движутся, т. е. у обеих оси t наклонены к оси x , образуя некоторый острый угол. Пусть теперь из начала координат (рис. 11) распространяются

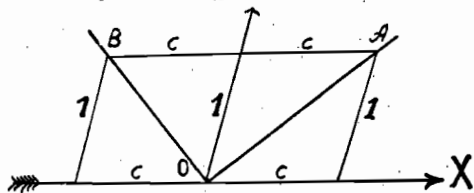


Рис. 11.

световые лучи. В трехмерном пространстве лучи распространяются во все стороны; в нашей одномерной диаграмме они пойдут направо и налево. Лучи распространяются с конечной скоростью, каждому t соответствует определенное x , если t возрастает на 1, x возрастает на c (скорость света). Следовательно, в нашей пространственно-временной диаграмме распространение лучей изобразится наклонной прямой линией, пробегающей между осями x и t ; таких прямых линий будет две, соответственно двум лучам, распространяющимся вправо и влево. Конечно, безраз-

лично, каким отрезком изобразить c на чертеже. Отложим его так, чтобы обе прямые, изображающие распространение лучей, были перпендикулярны одна к другой; этого можно достигнуть, если отложить на чертеже c сантиметров такой же длины, как и $t=1$; в этом случае справа и слева от оси t мы получаем равнобедренные четырехугольники, диагонали которых взаимно перпендикулярны. Перейдем от системы x, t к системе x', t' с тем же началом координат O , но с другим направлением оси t' ; новая система, следовательно, движется относительно первоначальной. Однако в обеих системах направление прямых распространения лучей, т. е. прямых OA и OB , останется тем же самым. Эти две прямые дают, следовательно, две оси координат с совершенно исключительными свойствами; мы обозначим эти оси через ξ и η . Эти оси всегда на том же месте и не допускают произвола. Это, так сказать, не произвольно избранные, а божьей милостью координатные оси. Мы будем называть их главными координатными осями. Однако, эти координаты не так просты, как прежние; раньше x —была пространственной координатой, t —временной, новые оси—обе пространственно-временные оси. Но это как раз совпадает с нашими желаниями, в этих осях слились пространство и время. При этом мы распространяем нашу диаграмму не только на площадь над осью X —ов, но и под нею, т. е. мы рассматриваем не только будущие события ($t > 0$), но и прошедшие ($t < 0$). В наших абсолютных координатах (рис. 12) каждая „точка“, или „событие“ p определяется некоторыми координатами ξ и η .

Нетрудно связать новые координаты с координатами x и t или x' и t' подвижной системы. Легко видеть, что

$$\xi = x + ct = x' + ct'$$

$$\eta = x - ct = x' - ct'$$

перемножая эти равенства, находим

$$\xi\eta = x^2 - c^2 t^2$$

$$\xi\eta = x'^2 - c^2 t'^2.$$

Произведение $P = \xi\eta$ соответствует площади прямоугольника, образованного сторонами ξ и η . Все точки p , для которых эта площадь одна и

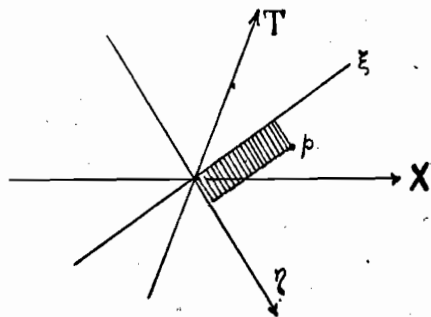


Рис. 12.

та же по величине, могут быть объединены в одно множество; нетрудно показать, на какой кривой укладываются все такие точки. Чем больше ξ , тем, очевидно, меньше должно быть η , для того, чтобы произведения $\xi\eta$ оставались по-

стоянными; наша кривая должна, следовательно, все ближе и ближе приближаться к самим осям координат по мере удаления от начала, совпадая с ними, однако, только в бесконечности. Такая кривая называется равносторонней гиперболой, она изображена на рис. 13. Давая произведению $\xi\eta$ различные значения, будем получать, очевидно, и различные гиперболы; если произведение будет отрицательным, т.-е. ξ и η будут иметь различные знаки, кривые расположатся в верхнем и нижнем углах между осями (рис. 13). На ри-

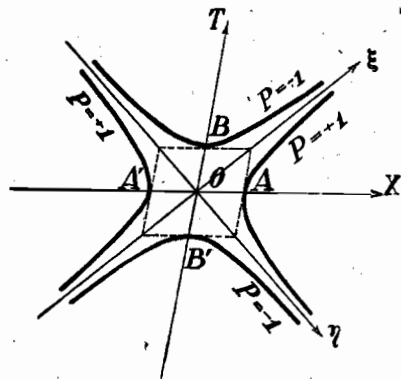


Рис. 13.

сунке начерчены все четыре ветви гипербол для значений $P = \pm 1$. Отсюда мы получаем наглядные меры для пространственных и временных отрезков. По линии OA , как видно из рисунка, $t = 0$, т.-е. по нашей формуле

$$\xi\eta = x^2 = 1.$$

Поэтому $OA=1$, также $OA'=1$; отрезок OA представляет единицу длины, скажем 1 километр. По линии OB , как видно из рисунка, $x=0$, т.е.

$$\eta\xi = P = -c^2 t^2 = -1.$$

Откуда

$$t = \frac{1}{c}$$

Таким образом отрезок OB дает новую единицу времени уже не секунду, а $\frac{1}{300.000}$ секунды, т.е. время, за которое свет успевает распространиться на единицу длины—один километр. Наши гиперболы являются своего рода эталонами, устанавливающими меры пространства и времени. Наконец, мы решили задачу, поставленную в первой части, мы нашли переводный множитель между временем и пространством, он содержится в формуле:

$$t = \frac{s}{c}.$$

Отношение определяется скоростью света, т.е. величиной универсальной и абсолютно постоянной. Нам остается решить еще одну задачу: найти количественную связь между материей и энергией. У читателя наверно уже есть предчувствие, что и в этом случае скорость света играет первостепенную роль.

Пока, однако, остановимся на полученной картине мира. Она имеет еще чисто формальный вид пространственно-временной картины, имею-

щей преимущество законченности. Всякая мировая линия, пересекающая гиперболу,

$$\xi\eta = 1$$

может служить осью x системы отчета, при чем соответствующая ось времен t будет параллельна касательной к гиперболе в точке A . Наоборот, всякая мировая линия, пересекающая гиперболу, определяемую уравнением

$$\xi\eta = -1$$

может служить осью времен, при чем соответствующая ось x -ов параллельна касательной гиперболы в точке B . Эта картина мира заменяет нам, следовательно, прежнюю (рис. 5), в которой все оси x -ов совпадали, а оси времен были, вообще говоря, наклонны к оси x . Теперь обе оси x и t различны для разных систем отсчета, но зато мы имеем новые, действительно абсолютные оси, которые мы нашли из факта постоянства скорости света. Заметим, однако, следующее. Наш рисунок начерчен в определенном масштабе, именно 1 километр для отрезков $\frac{1}{300.000}$ секунды для времен; теперь уже ясно, что такой выбор масштаба был намеренный. Если бы по старому мы выбрали, напр., километр как единицу отрезков, и секунду, как единицу времен, то наш рисунок был бы совершенно иным. Ось времен чрезвычайно бы сжалась в сравнении с осью x -ов, обе световые оси образовали бы между собою вместо прямого чрезвычайно острый угол, при чем гиперболы должны бы были расположиться внутри этих малых углов, мы получили бы во-

обще картину, сходную с картиной классической механики (грубо-приближенно это изображено на рис. 14). Наш выбор масштаба является не-

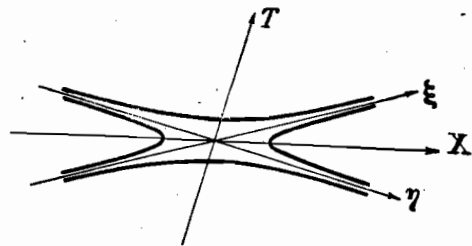


Рис. 14.

обычайно важным шагом вперед, позволяя ясно различить истинные соотношения. Эти соображения несколько уясняют, почему в течение стольких веков удовлетворялись старой картиной мира. Основная причина заключалась в том, что оперировали со скоростями чрезвычайно малыми сравнительно со скоростью света. Только в наше время воспользовались быстрым движением небесных тел и тех катодных частичек (электронов), которые несутся с огромными скоростями в пустотных трубках. В сравнении с этими скоростями скорость света уже не кажется неизмеримо большей, и в этом случае „старый чертеж“ приходится заменять новым.

20. Преобразование Лорентца. Постоянство скорости света. Перспектива времени. Мир Минковского.

Мы теперь достаточно подготовлены для того, чтобы вывести формулы, задача которых — заметить преобразование Галилея. Эти формулы носят название преобразований Лорентца.

Рассмотрим снова две системы S и S' , движущиеся с относительной скоростью v одна относительно другой. Начало координат системы S' в самой системе S определяется условием $x' = 0$; в системе же S эта точка определяется соотношением $x = vt$, или $x - vt = 0$. Можно бы, пожалуй, сказать, что оба условия должны быть тождественными; но такое заключение слишком поспешно (и даже неверно, как увидим далее), так как мы не знаем еще ничего положительного о соотношении мер в обеих системах. Для начала координат оба условия действительно тождественны:

$$\begin{aligned} x' &= 0 \\ x - vt &= 0 \end{aligned}$$

для всякой же другой точки ясно только то, что обе величины x' и $x - vt$ должны быть в постоянном отношении, назовем это отношение через q :

$$\frac{x - vt}{x'} = q$$

или

$$qx' = x - vt.$$

Такое же соотношение должно существовать и в системе S' , т.-е.

$$qx = x' + vt'$$

Фактор q пока произволен, но он определяется из принципа постоянства скорости света, т.-е. из знакомого нам уже уравнения:

$$\xi\eta = x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2.$$

У нас система из трех уравнений; определяя из первых двух значения x' и t' и подставляя в последнее уравнение, находим:

$$q^2 = 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - b^2$$

т.-е.

$$q = \sqrt{1 - b^2}.$$

Выражение нам уже знакомое. Пользуясь им, окончательно находим формулы перехода от x к x' и от t к t' (координаты y и z по условию остаются неизменными):

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - b^2}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c}x}{\sqrt{1 - b^2}}$$

Если бы скорость света была бесконечно большой, то мы получили бы прежние формулы Галилея:

$$x' = x - vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t.$$

Если бы свет был мгновенным дальнодействием, вся современная теория относительности была бы излишней, достаточно было бы классической теории относительности.

Таким образом решающим фактом является конечность скорости распространения света. С другой стороны, из наших формул следует и другое поразительное заключение: в мире не может быть скорости, большей скорости света. Если бы v в наших формулах стало больше c , то подкоренное количество стало бы отрицательным, т.-е. мы бы получили для x' и t' то, что математики называют мнимой величиной, в природе же все, действительно, наши формулы потеряли бы смысл.

Рассмотрим теперь следствия наших уравнений в отношении к длинам и промежуткам времени. Для простоты возьмем линейку, длина которой равна единице в системе S . Мы уложим эту линейку в системе S вдоль оси x так, чтобы начало ее совпадало с началом координат, а конец соответствовал $x = 1$. Воспользуемся сначала представлениями классической теории относительности. Пусть линейка в системе S находится в покое, т.-е. начало линейки все время остается на оси времен t , а другой конец линейки, следовательно, всегда в расстоянии 1 от оси времен. Площадь $abcd$ (рис. 15) дает пространственно-временную картину линейки. Если бы линейка была в покое в системе S' , то она изобразилась бы на нашем рисунке площадью $abef$; на самом деле линейка движется в системе S' , и в этой системе она изобразится той же площадью $abcd$. С точки зрения системы S' начало линейки передвинулось назад на отрезок ec , а конец — на отрезок fd ; оба эти отрезка, очевидно, равны, поэтому линейка имеет одну и ту же длину в обеих системах. Это происходит потому, что изме-

рение длины мы производим все время в направлении оси x ; направления же x и x' совпадают. Переходя от такого классического изо-

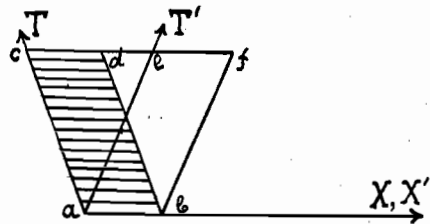


Рис. 15.

бражения к современному, мы находим не только две различные оси T , но различные оси x -ов (рис. 16) и, кроме того, вспомогательные гиперболы-„эталон“, определяемые условием

$$\xi\eta = \pm 1$$

В системе S , длина линейки $ab = 1$, в системе же S' (ось x') равна длине ah , меньшей единицы, так как по оси x' единица, т.-е. расстояние от начала координат до гиперболы, равна ag . Произведя вычисления, найдем, что

$$S' = s\sqrt{1 - b^2}.$$

Эти соотношения станут яснее, если мы воспользуемся знакомым представлением „перспективы“. Длина линии, находящейся в пространстве, кажется нам различной в зависимости от того, под каким углом мы на нее смотрим: если этот угол прямой—длина наибольшая. В нашем случае мы также имеем дело с перспективным сокра-

щением, но не с пространственным, а с пространственно-временным. С движущейся системы мы видим линейку в иной „временной перспективе“, а потому укоротившейся, и тем значительнее, чем острее „угол временного зрения“, т.-е. чем скорее движется система относительно системы S .

Те же соображения можно распространить и на промежутки времени. Для этой цели придется только воспользоваться верхней и нижней гиперболой нашего рисунка. Мы получим тот же результат, единица времени кажется сократившейся при рассматри-

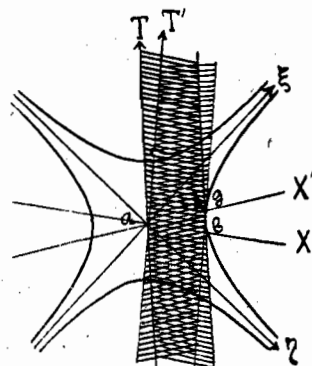


Рис. 16.

вании из другой движущейся системы, наблюдатель в одной системе будет считать отстающими часы другой системы. Мы не будем, однако, углубляться в дальнейшие выводы, которые можно сделать при помощи нашего чертежа. Считаем нужным только отметить, что это наглядное представление пространственно-временных соотношений является одним из изящнейших достижений теории относительности. Оно указано скончавшимся в расцвете лет математиком Минковским.

21. Движущаяся и покоящаяся массы. Эквивалентность массы и энергии.

До сих пор мы занимались исключительно геометрией движения, сосредоточившись на понятиях пространства и времени в современной теории относительности. Разумеется, и динамика движения, т. е. соотношения между силами, массами и движением должны существенно измениться в новой теории. Основным выводом теории в этом отношении является непостоянство массы, зависимость массы от движения. Если мы обозначим через m_0 — массу, находящуюся в покое, а через m — массу, движущуюся прямолинейно и равномерно со скоростью v , то в теории относительности необходимо следует, что

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Этот замечательный вывод не является, однако, совершенно неожиданным. Уже в первой части мы подозревали существование некоторой зависимости массы от движения. Современная теория электричества приводит к той же формуле независимо от теории относительности¹⁾. Эту формулу мы можем переписать так

$$m = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots \right) = m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \cdot \frac{1}{c^2} + \dots$$

¹⁾ Примечание 3.

Очевидно, только члены второго порядка имеют еще физический интерес, так как остальные члены по своей малости совершенно недоступны измерению. В этом новом виде формула зависимости массы от скорости несколько ближе непосредственному пониманию. Масса является суммой двух выражений, покоящейся массы и некоторой новой „кинетической массы“:

$$\frac{1}{c^2} \frac{m_0 v^2}{2},$$

но величины

$$\frac{m_0 v^2}{2} = E,$$

энергия движения тела, „кинетическая“ энергия тела, его „живая сила“. Таким образом „кинетическая“ масса

$$m' = \frac{E}{c^2}.$$

Многочисленные факты физики и физической химии приводят к заключению, что во всякой „статической“ массе, встречающейся в природе, мы имеем дело с внутренними движениями ее частиц, молекул, атомов, электронов; поэтому до некоторой степени и на статическую массу мы можем распространить найденное соотношение:

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

С этой точки зрения масса — только форма энергии. Таким образом мы достигли решения той

задачи, которая была поставлена нами в первой части: разыскать переводный множитель между массой и энергией. Подобно тому, как время нам приходится умножать на скорость света для перехода к пространственным мерам, массу нужно умножить на квадрат скорости света для того, чтобы выразить ее через энергию:

$$s = c.t$$

$$E = c^2.m$$

c —огромная величина, 300.000 километров в секунду, поэтому ничтожному промежутку времени соответствует длинный пространственный отрезок; во втором уравнении переводный множитель— квадрат скорости света, т.е. 900 триллионов километров. В грамме массы в той или иной форме (т.е. в форме внутренних натяжений, энергии движения молекул, атомов, электронов) кроется колоссальный запас энергии, не менее 900 триллионов эргов. Один из тех изобретателей, которые при всяком случае ищут практического применения, уже вычислил, что, если бы можно было воспользоваться внутренней энергией массы, нам потребовалось бы не больше одного грамма каменного угля для передвижения большого парохода через океан.

Соотношение между массой и энергией может быть подтверждено и на опыте. Как мы видели, добавочная, „кинетическая“ масса зависит от величины $\frac{v^2}{c^2}$; для обычных доступных нам скоростей это отношение необычайно мало. Даже земля движется сравнительно с небольшой ско-

ростью 30 километров в секунду; масса земли приблизительно равна 6 триллионам килограммов, следовательно, добавочная „кинетическая“ масса по нашей формуле равна 30000 килограммам. Сама по себе эта масса значительна (она соответствует приблизительно массе двух товарных вагонов при полной нагрузке), но в отношении к общей массе земли она ничтожно мала и недоступна измерению. Но физику-экспериментатору доступны зато другие массы, ничтожно-малые сами по себе, но несущиеся с огромными скоростями, сравнимыми со скоростью света. Это—массы электронов, выделяющихся при распаде радиоактивных элементов. „Покоющаяся“

масса электрона составляет всего $\frac{1}{1830}$ массы

атома водорода, но тем не менее физик имеет в своих руках средства для точного ее измерения. Целый ряд исследований показал, что масса электронов, несущихся с большими скоростями, переменна, постепенно увеличиваясь по мере приближения скорости электрона к скорости света. Формула зависимости массы от скорости подтвердилась и количественно. Мы имеем право предположить, что и „покоющаяся“ масса электрона обязана своим существованием каким-то внутриэлектронным, пока нам неизвестным движениям. С этой точки зрения массы не существует, есть только энергия движения. Масса и энергия сливаются воедино.

22. Специальная и общая теория относительности. Кривизна пространства. Искривление световых лучей.

Классическая и современная (специальная) теории относительности имеют то общее, что они пригодны только для случая прямолинейного и равномерного движения. С одной стороны, это — сильное ограничение теории, с другой — непонятное предпочтение прямолинейно-движущимся системам, тем более, что в природе движения такого рода — редчайшее явление. Нельзя ли распространить теорию на какие угодно случаи движения? Возможна ли, иначе говоря, общая, а не специальная теория относительности? Возможность этого показана рядом необычайно-смелых и остроумных работ Эйнштейна, постепенно появляющихся с 1905 г. по 1915 г. Эти работы допускают только сложное математическое изложение. Мы должны удовлетвориться самым общим представлением о сути дела. Укажем, что уже в первой части нашего изложения мы несколько раз пользовались основной мыслью Эйнштейна, являющейся фундаментом общей теории относительности.

Смысл специальной и классической теории заключается в том, что все процессы природы, протекающие в каких угодно прямолинейной и равномерно движущихся системах, происходят по одним и тем же законам, процессы определяются ускорением, а не скоростями, ускорения же не зависят от взаимного прямолинейного и равномерного движения систем. Но как только

системы приобретают ускорение в своем движении, безразличность систем не имеет более места, так как ускорения, определяющие ход процессов, конечно, меняются в зависимости от ускорения самой системы. Если тем не менее различные системы отсчета эквивалентны между собою, то, очевидно, для сохранения эквивалентности мы должны кое-что изменить хотя бы в одной системе. Вспомним два случая движения, уже рассмотренные нами в первой части, случай прямолинейного ускоренного движения и равномерного вращения. В обоих случаях мы видели, что соответствующие тела могут рассматриваться как покоящиеся, если ввести тяготение внешних масс. Мы не можем решить, являются ли наблюдаемые нами процессы следствием ускоренного движения системы или же результатом действия внешних тяготеющих масс, соответственно действующих на покоящиеся тела. С таким же правом, как мы объясняем падение камня притяжением земли, мы могли бы объяснять сплющивание вращающегося шара результатом действия окружающих вращающихся масс. В этом нет принципиальных затруднений, хотя в отдельных случаях такая эквивалентность может казаться неожиданной и странной. Возникают, однако, два других затруднения, связанных одно с другим.

До тех пор, пока дело идет об одном изменении, задача разрешается довольно просто: данное направление или совпадает с направлением движения, ускорения, или действия сил, или образует с ним прямой или острый угол; во всех случаях соотношения довольно наглядны и могут быть вычислены. Но уже при переходе к двух-

мерному пространственному многообразию, т. е. к поверхности, дело усложняется. На поверхности существуют линии различных направлений, параллельные и перпендикулярные к движению, в случае вращения, напр., касательные и радиальные направления. Но по принципу „сжатия“ эти направления ведут себя различно, вдоль радиальных направлений поверхность останется неизменной, вдоль касательных—сожмется. Результатом явится полное бесповоротное искажение геометрических форм, определяющих, конечно, и физические формы и события.

Напр., на вращающемся диске потеряет силу знаменитое положение геометрии о том, что отношение окружности к диаметру равно π (около $\frac{22}{7}$). Получается впечатление, что на вращающемся диске нарушаются законы плоской геометрии. Однако, и на такой „искаженной“ плоскости точки диска могут быть определены координатами, но не обычными, а так называемыми Гауссовыми координатами, названными так в честь великого математика, их открывшего. Для однообразного соотношения мер по всем направлениям на вращающемся диске мы должны ввести искривленные координаты. Наш диск остается пространственно-плоским, но вследствие вращения в нем появилась, так сказать, „кривизна времени“. На исправленном же диске царят совершенно иные геометрические законы, чем на плоском, в частности кратчайшим расстоянием между двумя точками будет не прямая, а кривая, вполне определенная линия, так называемая геодезическая линия. Все это пока до-

вольно ясно, но что будет, если мы перейдем к трем измерениям? Опираясь на предшествующее и рассуждая по аналогии, мы и в этом случае должны говорить о „кривизне“ пространства. Наше пространство уже не будет плоским пространством классической геометрии Эвклида, а искривленным, „неэвклидовым“ пространством, оно соответствует уже не плоскости, а искривленной поверхности. Такие заключения легко могут привести к недоумению, если только забыть о том, что наше пространство—физическое, что в нем действуют силы, вызываемые присутствием тел, что пространство—не мертвая форма, а поле сил; именно потому, что пространство—поле сил, оно искривлено. Итак, в нашем пространстве кратчайшие расстояния не прямые, а геодезические линии, по крайней мере всюду, где существует тяготение. Поэтому движение по инерции будет происходить уже не по прямой, а по геодезической линии. Для успокоения читателя заметим, что кривизна нашего пространства чрезвычайно мала, даже вблизи таких чудовищных масс, как солнце, так что пространство в пределах всевозможных практических потребностей может рассматриваться как Эвклидово (плоское). Но по существу кривизна, конечно, остается фактом, поэтому, если бы какой-нибудь путешественник отправился по „прямому“ направлению в пространство, он мог бы вернуться в исходную точку, подобно тому как корабль, совершив кругосветное путешествие, возвращается в родной порт. Отсюда следует важное заключение принципиального характера: мир—конечен. Для физика, который неохотно

оперирует с бесконечным, это, очевидно, приятно. Но этот конечный мир в то же время безграничен, так как замкнутые кривые не имеют ни конца, ни начала. Эти соотношения легко себе представить на поверхности шара, как мы уже видели в первой части.

Небесполезно иллюстрировать все эти довольно отвлеченные соотношения таким физическим примером. Поверхность воды в сосуде горизонтальна всюду, за исключением краев, где она несколько изгибается (рис. 17) и поднимается.

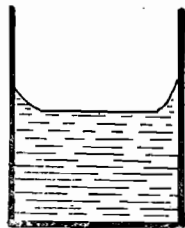


Рис. 17.

Причиной этого изгиба является притяжение между частицами воды и стекла, так называемые капиллярные силы. Совершенно так же мы можем представлять себе пространство всюду „плоским“, за исключением тех мест, где действуют силы тяготения, „искривляющие“ пространство больше или меньше в зависимости от величины силы. Таким образом кривизна пространства в различных местах различна, более того, она меняется со временем, так как тяготеющие массы находятся в постоянном движении; пространство неоднородно и изменчиво, изгибаясь и извиваясь подобно гусенице. Сам Эйнштейн сравнивает пространство с моллюском.

Мы опять должны, однако, обратиться к математике, чтобы понять сущность новой, неевклидовой геометрии. В обычном пространстве длина отрезка (расстояние некоторой точки от

начала координат) определяется по теореме Пифагора формулой:

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Мы должны изменить эту формулу в двух направлениях. Прежде всего надо ввести четвертое измерение — время. Каким же образом это можно сделать? Мы уже видели, в какой форме входит время в уравнение. Напомним наше уравнение гиперболы-эталоны:

$$\xi\eta = x^2 - c^2 t^2$$

В этой же форме войдет время и в выражение для s^2 :

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2.$$

Это соотношение справедливо в евклидовой геометрии, мы должны однако перейти к неевклидовой геометрии, заменив прямоугольные координаты косоугольными; теорема Пифагора при этом теряет силу и, так сказать, обобщается. Все члены должны иметь свои меры длины, т. е. получить соответствующий новый множитель; далее, кроме квадратов пространственно-временных координат, должны появиться взаимные произведения координат; мы получим таким образом выражение, которое можно назвать обобщенной теоремой Пифагора для искривленного четырехмерного пространства:

$$s^2 = f_1 x^2 + f_2 y^2 + f_3 z^2 + f_4 t^2 + g_1 xy + g_2 xz + g_3 xt + g_4 yz + g_5 yt + g_6 zt$$

Это уравнение служит основой всех точных исследований в общей теории относительности.

Искривления, необходимость которых мы установили, простираются на прямые линии любого типа; среди этих прямых есть класс для нас особенно интересный — световые лучи. Поместим снова в тот замкнутый ящик, свободно парящий в пространстве, в котором мы уже бывали, и предположим, что в боковой стенке ящика есть отверстие, через которое в ящик проникает световой луч. Пока ящик в покое (рис. 18-а), луч идет горизонтально; если ящик

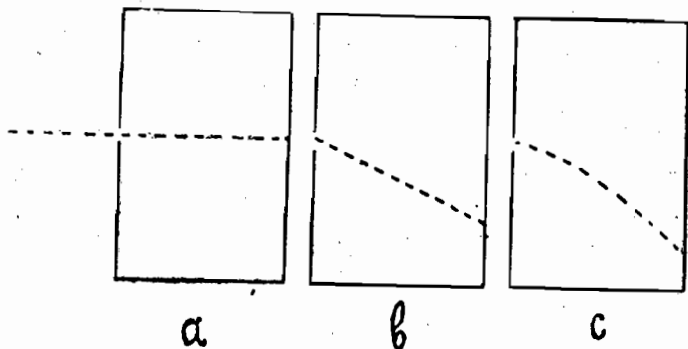


Рис. 18.

начинает двигаться равномерно вверх или вниз, то луч направится по наклонной прямой (рис. 18б); если же ящик начнет двигаться с ускорением, луч искривится (рис. 18с). Искривление является таким образом результатом ускоренного движения системы, в которой производится наблюдение. Но по принципу эквивалентности мы должны получить тот же результат, если система наблюдения находится в покое, но действует сила

тяготения; в присутствии тяжелых масс световой луч искривится и отклонится от своего нормального пути, подобно комете, пробегающей вблизи солнца.

23. Отклонение световых лучей солнцем. Аномалии орбиты Меркурия. Смещение спектральных линий в красную сторону спектра.

Мы подошли к тому факту, который был предсказан Эйнштейном и, возбуждив напряженное внимание к теории относительности, привлек к ней много друзей. От всякой теории требуют прежде всего положительного успеха, а теория относительности объясняла пока только уже осуществленные опыты с отрицательным результатом, вроде опыта Майкельсона. В данном случае мы имеем дело с положительным предсказанием приблизительно того же значения, как и теоретическое предсказание Леверрье о необходимости существования новой планеты, вызывающей неправильности движения Урана; предсказание Леверрье подтвердилось, планета была найдена и названа Нептуном. Подобно тому, как Леверрье мог предвычислить местонахождение новой планеты на небесном своде, и Эйнштейн вычислил величину отклонения луча света при прохождении вблизи солнца. Величина этого отклонения очень мала, всего 1,7 секунды (рис. 19).

Такое отклонение и почти той же величины было действительно обнаружено английскими астрономами во время полного солнечного за-

тмения 1919 г. Противники теории относительности пытаются, конечно, найти другие объяснения нового замечательного факта; но ни одно объяснение не дает такого точного количественного совпадения, как теория Эйнштейна¹⁾.

Существует и другое следствие теории, доступное опытной проверке помощью астрономических наблюдений. В период расцвета

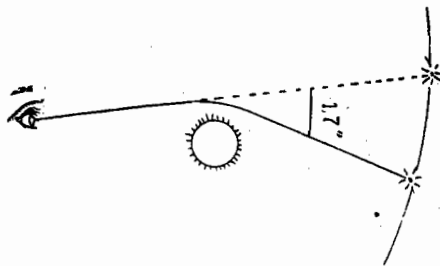


Рис. 19.

естествознания, в век Галилея, Кеплера и Ньютона, мало-по-малу удалось установить основные законы движения тел, земных и небесных. Эти законы нашли свое завершение в законе тяготения Ньютона. Но принципиально этот закон не может быть совершенно точным, он покоится на предположении непосредственного дальнего действия, возможность которого мы

¹⁾ Примечание 4.

исключаем, заменяя его действием поля или же соответствующей полю кривизной пространства. Для получения точного закона, определяющего движение планет, нужно получить соответствующее уравнение при помощи обобщенной теоремы Пифагора, коэффициентам которой f и g даются значения, определяемые задачей. Эйнштейн решил эту задачу и нашел, что закон, определяющий движение планет, весьма близок к закону Ньютона. Весьма близок, но все же не совпадает: существуют отклонения, и одно из них настолько значительно, что может быть проверено наблюдением. Оно относится к планете Меркурию; это неудивительно, ибо Меркурий — ближайшая планета от солнца и находится поэтому в наиболее сильном поле тяготения, или, как мы можем еще сказать, в области пространства наибольшей кривизны. В движении Меркурия давно были замечены особенности. Меркурий, подобно другим планетам, вращается не по кругу, а по эллипсу; при этом большая ось эллипса, а следовательно и весь эллипс, не остается в покое, а медленно вращается, поворачиваясь за столет на $\frac{1}{6}$ градуса. Часть этого движения вызывается возмущающим действием других планет, однако, если учесть и эту причину, то все же остается необъяснимое раньше вращение эллипса Меркурия на 43 секунды в столетие. Этот факт, несмотря на его незначительность, все же являлся существенным ударом для теории Ньютона, точно выполняющейся в других случаях. В теории Эйнштейна, однако, вращение эллипса Меркурия является необходимым следствием,

при чем вычисленная величина вращения хорошо совпадает с наблюденной.

Теория относительности выдержала, таким образом, с честью и новое испытание. Для нас этот успех теории существенен еще в одном отношении. По закону Ньютона:

$$K = \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

т.-е. сила притяжения между массами зависит только от их величин и расстояния между ними, т.-е. от их относительного положения. В новой теории тяготения эта сила зависит, как это можно было ожидать и заранее, от относительной скорости притягивающихся тел. Тем самым закон тяготения принимает форму, типичную вообще для физики эфира: мы знаем, что электрические и магнитные силы зависят от скоростей. Таким образом сделан еще шаг в направлении обобщения законов природы.

В заключение укажем еще на одно замечательное следствие общей теории относительности. Все соотношения, как пространственные, так и временные, меняются в поле тяготения, поэтому, напр., часы должны идти на солнце медленнее, чем на земле. На солнце действительно существуют часы, конечно, не с маятником и пружинами, а совершенно особого устройства. Это—те, регулярно колеблющиеся, частицы атомов и молекул, которые посылают свет на землю. В зависимости от частоты колебаний атом посылает свет различной окраски: атомы, колеблющиеся медленно, посылают свет более близкий к красной части спектра; атомы, колеблющиеся

быстрее, излучают свет, сдвинутый к синей части. Поэтому ясно, что если имеются два совершенно одинаковых атома на земле и на солнце, напр., два атома натрия, и свет, излучаемый обоими, будет наблюдаться на земле, то цвет лучей, исходящих от земного и солнечного натрия, должен быть различным. Атом на солнце должен колебаться медленнее, свет, излучаемый им, должен сделаться „краснее“. Разница в окраске при этом, однако, будет столь мала, что может быть замечена только в самые совершенные спектроскопы. Существование такого рода „красного смещения“ замечено во многих случаях. Однако нет еще полной уверенности в том, что оно не вызывается другими причинами. В настоящее время вопрос о подтверждении этого следствия общей теории относительности приходится пока считать открытым ¹⁾.

Теория относительности дала также возможность разобраться в некоторых очень сложных вопросах, связанных с внутренним строением атома. Мы не имеем, однако, возможности останавливаться на этом успешном применении теории относительности. Если по праву приходится удивляться великому достижению Ньютона, связавшего одним законом движения планет и падение яблока с дерева, то не менее поразительно и новое достижение, определяющее явление мира неподвижных звезд и тончайших частей атома!

¹⁾ Примечание 5.

24. Выводы. Физика и философия.

Мы у цели, и можем оглянуться на пройденное. Наше путешествие распадается на три части: Первая — классическая теория относительности, имена Коперника, Галилея и Ньютона служат здесь нам маяками. В итоге мы все же заблудились в чаще, из которой нам не выбраться, пока не уяснится взаимоотношение механической физики и физики эфира. Два обстоятельства являются здесь решающими: гипотеза эфира и постоянство скорости света. Все попытки удержать эфир, как носителя оптических явлений, терпят крушение; вместо эфира на сцену появляется мир пространства и времени, как нечто объективное и физическое. Рассмотрение эфирных явлений (будем так называть их и по устранении эфира) требует изменения классической теории относительности, мы переходим к новой, пока специальной теории, относящейся только к прямолинейно-равномерным движениям. Эрнст Мах, физик и философ, проложил дорогу этой теории¹⁾, Лорентц сделал первые решительные шаги, Эйнштейн обосновал ее и Минковский ей придал ей форму картины мира. Чаша пройдена, но за ней нет еще свободной дороги. Мы еще только в чистилище, а не в раю. Мы освободимся от всех затруднений и подыдем выше всего частного и специального, пройдя только третью часть дороги — общую теорию относительности. Пионерами по рас-

¹⁾ Примечание 6.

чистке этого участка нашего пути были Гаусс и Риманн с их теорией поверхностей, основателем же общей теории, как и специальной, является Эйнштейн. Гениальный математик Вейль дал законченную, поразительную форму этой теории, форму, к сожалению, доступную для понимания только немногим смертным.

Смысл всех трех теорий следующий. В классической теории относительности место, момент и скорость — понятия относительные, зависящие от выбора системы отсчета. Наоборот, отрезки, промежутки времени и ускорения в этой теории понятия абсолютные. Классическая теория простирается на всю область чисто механических явлений. Но что же такое чисто механические явления? Являются ли, напр., таковыми движения небесных тел? Мы ответим: нет! Для наблюдения этих движений мы пользуемся светом, исходящим от небесных тел, явления, следовательно, одновременно оптического характера; далее мы сводим движение небесных тел к тяготению, но тяготение входит в великую систему механико-электромагнитных процессов. Механическая физика и физика эфира таким образом сливаются. Классическая теория относительности оказывается недостаточной, она приводит к прямым противоречиям с опытом, мы вынуждены ее радикально реформировать. Реформа состоит в том, что и отрезки и промежутки времени становятся относительными, т.-е. тот же самый пространственный отрезок или промежуток времени оказывается различным в зависимости от выбора точки зрения. Подобно пространственной перспективе, суще-

ствуется более общая перспектива, пространственно-временная. Идея эфира более не приемлема, на ее место вступает отвлеченная картина четырехмерного пространственно-временного мира. Эта новая, но все же еще частная, специальная теория относительности решает много затруднений, но в некоторых пунктах бессильна и она. Слабость ее в том, что она приемлема только в случаях прямолинейно-равномерных движений.

Появляется общая теория, заявляющая, что все системы координат равноправны, как бы они ни двигались. Но это возможно только путем введения новых сил, частью механической (тяготение), частью электро-магнитной природы (излучение). Задача будущего — слить эти два класса сил воедино. Появление сил, пронизывающих мир, вызывает искривление пространства тем большее, чем больше сила, действующая в данном месте вблизи больших масс и электрических зарядов. Эфир устранен, носитель явлений — только материя, но она сливается в одно с энергией, подобно времени и пространству. Мир и все, что в нем происходит, — конечны, конечны и скорости тяготения и излучения, но эта скорость есть предельная скорость реального мира.

Таковы главные выводы. Фактически новая картина мира очень мало отличается от привычной, так как мы имеем почти всегда дело со скоростями, ничтожно малыми сравнительно со скоростью света. Но в двух классах явлений значение теории относительности очень существенно: в небесных движениях и в тончайших электрических процессах, связанных с движением эле-

ктронов, наблюдаемых в лаборатории. Мы еще раз подчеркнем: теория относительности — одно из величайших достижений науки всех времен, но она совершенно не имеет значения для явлений обыденной жизни, а также и для большинства явлений природы, исследуемых естествоиспытателем. Те, для кого важна именно эта сторона теории, могут спать спокойно. Что касается будущего возможного влияния на технику, то лучше воздержимся от каких-либо предсказаний; ясно одно, что сейчас не видно пока и тени того мостика, который можно бы было перебросить между теорией относительности и техникой, даже в том соблазнительном пункте, где связывается материя и энергия.

В заключение еще несколько слов об отношении к философии. Очевидно, что наша теория имеет значение для философии, и не только имеет значение, она предчувствовалась философией, хотя и в совершенно расплывчатой и неясной форме; не будем называть здесь еще раз Э. Маха¹⁾, даже в творениях Канта есть места, которые могут быть истолкованы „релятивистски“. Это тем более существенно, что учение Канта о пространстве и времени диаметрально противоположно положениям нашей теории. Но несмотря на все, едва ли и теория относительности сможет перебросить мост между физикой и философией. Философ будет считать себя в праве, и в некотором смысле не без основания, создавать рядом с миром Эйнштейна-Минковского свой собственный философский мир,

¹⁾ Примечание 6.

где пространство и время будут твердо удерживать свои абсолютные атрибуты. „Твердо удерживать“—выражение не совсем правильное: все философские понятия очень неустойчивы, можно сказать даже, что почти каждый философ-мыслитель создает свои понятия. В противовес этому теория относительности дает прочную картину мира, в которой ничего нельзя поколебать или разрушить.

Уже несколько тысячелетий люди думают об опасности столкновения земли с каким-нибудь бродячим небесным телом, опасаясь разрушения нашей планеты; однако эта опасность очень мала, мировое пространство столь велико, что все тела, в нем движущиеся, имеют возможность проскальзывать друг около друга без столкновений. Но не менее обширен духовный мир человека; по всей вероятности и в будущем физика и философия будут безнаказанно пролетать одна около другой к большому разочарованию тех, кто охотно бы посмотрел на зрелище столкновения в надежде узнать, кто больше пострадает: физика или философия.

Примечания переводчика.

1. Физик, на которого указывает автор,—Пауль Ленар, один из наиболее выдающихся современных экспериментаторов Германии. В последние годы Ленар выступил резким критиком теории относительности, став своего рода главою „анти-релятивистского“ движения. В этой критике, может быть, слишком много раздраженности и увлечения, подобно тому, как в самой теории немало преждевременных еще экстраполяций, обобщений и философских выводов; с другой стороны, критика Ленара вскрывает некоторые стороны и недостатки теории относительности, существенные для физика. По своему типу теория относительности примыкает к классу так называемых „термодинамических“ теорий физики. Учение о теплоте (термодинамика) построена так. Берутся два чисто опытных факта: 1) невозможность постройки так называемого вечного двигателя первого рода, т.е. машины, способной доставлять энергию без затраты внешней работы (закон сохранения энергии), 2) невозможность построить вечный двигатель „второго рода“, в котором бы всю теплоту, без затраты внешней работы, можно было превращать в полезную

механическую работу; нельзя, напр., от холодного тела передать его тепло горячему, не затратив на это работы (закон рассеяния энергии). Эти факты формулируются математически. Далее вся термодинамика является чисто логически-математическими следствиями двух исходных фактов, начал, никаких новых физических гипотез более не делается. Структура термодинамики похожа, следовательно, на структуру геометрии. Из аксиом-начал выводятся следствия-теоремы. Специальная теория относительности Эйнштейна—Лорентца построена так же. Взяты два начала: принцип относительности и постоянство скорости света, им дается математическая форма (преобразования Лорентца, ср. главу 20)—все остальное — только логически - математические следствия этих двух фактов-начал. Если физик не сомневается в исходных фактах, считая их вполне доказанными на опыте, то он не может сделать никаких возражений против следствий, поскольку они логически правильны, иначе пришлось бы сомневаться в законах логики. Общая теория относительности построена в существенном так же, привлекается только новая экспериментальная аксиома — эквивалентность инертной и тяжелой массы. С этой точки зрения возражения против теории относительности могут сводиться исключительно к критике исходных опытных фактов. Оснований для сомнения в этих фактах пока не существует, поэтому вся система уравнений теории относительности обязательна для современного физика. Критика начинается и может начинаться только с истолкования самих исходных фактов - начал. Закон сохранения энергии

в чисто механических явлениях может быть выведен из законов механики, в остальных областях физики этот закон—только опытный факт. Стремления физиков в XIX веке были направлены к механическому истолкованию всех явлений природы; в таком случае закон сохранения энергии перестал бы быть эмпирической аксиомой и стал бы механической теоремой. Это, однако, не удалось. Закон рассеяния энергии, второе начало термодинамики, как оказалось, не является опытной аксиомой, а может быть выведен из факта дискретности строения вещества; вещество построено из отдельных молекул, атомов, электронов, количество которых во всех реальных случаях необычайно велико, эти частицы движутся по законам случая, к этим движениям применимы законы теории вероятности и статистики. Стремление тепла переходить от горячего тела к холодному является с этой точки зрения стремлением к наиболее вероятному состоянию движения частиц, составляющих вещество. Рассеяние энергии связывается таким способом с вероятностью состояния. Этот вывод закона рассеяния привел одновременно к существенному ограничению. Законы статистики верны только для „больших чисел“, когда имеется огромное число статистических элементов. Поэтому и второе начало термодинамики будет выполняться только в том случае, если число частиц вещества велико; закон теряет силу для малого числа частиц, когда за конечный промежуток времени возможны и „маловероятные“ состояния. Во всех реальных случаях мы имеем дело с огромным числом частиц, поэтому практически закон рассеяния выполняется.

Термодинамика получила физическое обоснование, т.е. ее аксиомы были сведены к более элементарным и приемлемым для нас законам. Страстная борьба мнений вокруг теории относительности начинается именно с вопроса об истолковании ее аксиом, исходных фактов. В тексте переведенной книги изложены воззрения Лорентца и Эйнштейна. Физическое „сокращение“ Лорентца, конечно, заманчивее для физика-экспериментатора, чем сжимающееся время и пространство Эйнштейна. Не забудем, что время для физика—понятие вторичное, не даваемое непосредственным наблюдением. Наблюдение дает длины, скорости и ускорения. Для физика время—производная, придуманная функция этих опытных величин. „Философское“ пространство и время, конечно, не подлежат „злоупотреблениям“ физика, так же, как не подлежат его компетенции и опытам законы логики. Всякий физик одновременно человек, а потому и философ (хотя бы самый наивный и невежественный); если он физически оперирует над временем, то не над „философским“ временем, а над временем, являющимся некоторой чисто математической функцией опытных величин. С этой точки зрения воззрения Эйнштейна являются тавтологией, парафразой чисто математических преобразований Лорентца. Физик-экспериментатор, конечно, в глубине души недоволен таким „истолкованием“ аксиом теории относительности, ибо по существу здесь нет истолкования, для него теория относительности остается великолепной математической интерпретацией опыта, физическая интерпретация отсутствует.

Вполне примирясь с уравнениями теории Эйнштейна, Ленар в своей критике протестует прежде всего против всеобщности нового принципа, ограничивая применимость его областью движений, происходящих под действием сил пропорциональных массам (напр., тяготение). В подобных движениях действия инерции выпадают, во всех же других случаях движения инерция дает, по мнению Ленара, возможность абсолютно констатировать наличие неравномерного движения. Ленар предлагает назвать общую теорию Эйнштейна „расширенным принципом относительности“ или „гравитационным принципом“. Второе существенное замечание Ленара касается „устранения“ понятия эфира из физики — как следствия теории Эйнштейна. Устанавливая двойкость научного представления о природе, выражающегося или в чисто математическом описании явлений, или в конструировании мысленных моделей тех же явлений, Ленар указывает, что в математическом методе эфир устранен задолго до Эйнштейна, вернее даже и не появлялся там, а если и фигурировал иногда, то чисто внешним образом, как простое математическое обозначение. С другой стороны, отказ от эфира в методе моделей, в методе наглядного представления о природе, очевидно, равносильен отказу от самого метода. Подобное следствие едва ли может быть извлечено из принципа относительности, хотя бы и всеобщего. Ленар замечает, что многие свойства мирового эфира довольно ясно проступают в четырехмерном пространстве переменной кривизны Эйнштейна. В последнее время сам Эйнштейн

согласился с этим последним заключением своего критика ¹⁾. Ленар и другие физики до последнего времени не прекращают попыток истолковать основные факты, аксиомы теории относительности, т.е. главным образом опыт Майкельсона, на основании тех или иных механических или электродинамических моделей. Все эти попытки пока очень искусственны и не могут удовлетворить физика. Во всяком случае вопрос о физическом выводе начал теории относительности можно считать пока открытым, ни четырехмерная геометрическая интерпретация Эйнштейна, ни искусственные попытки механического и электродинамического истолкования задачи не решают. Физика остается неудовлетворенной, философия незатронутой (ср. заключение книги Ауэрбаха). В увлечении теорией относительности значительную роль играет ее изумительная математическая красота и завершенность, совершенно не передаваемая в популярном изложении. Физику теории относительности, необходимая для него как система формальных уравнений, крайне интересна с точки зрения тех новых опытных фактов, которые она предсказывает; многие из этих фактов могут быть объяснены и помимо теории относительности, подобно тому, как многие термодинамические выводы можно получить и совершенно иным путем, однако в теории относительности все эти выводы объединяются в одно математическое целое. По адресу теории отно-

сительности делалось и делается много возражений чисто парадоксального типа, вызываемых главным образом ненаглядностью самой теории и возникающими на этой почве непониманиями. Прекрасное устранение этих возражений дано Эйнштейном в его популярном „Диалоге о теории относительности“ ¹⁾.

2. Написанная форма закона Ньютона справедлива только при соответствующем подборе единиц. В общепринятой системе сантиметр-грамм-секунда закон выразится так:

$$k = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

где G — универсальная постоянная природы.

$$G = 6,68 \cdot 10^{-8} \text{ cm.}^3 \text{ g}^{-1} \text{ sec}^{-2}.$$

3. Зависимость массы от скорости движения, а также соотношение между массой и энергией могут быть выведены и помимо теории относительности из факта существования *светового давления*, как это указал Ленар. Необходимость давления света вытекает из всякой теории света, будет ли то теория истечения или волновая теория. Более того, это давление не является специфическим признаком света. Всякие распространяющиеся волны, будут ли то волны звука, волны на поверхности воды или световые волны, давят на встречные тела. При встрече с идеаль-

¹⁾ Перевод помещен во втором издании книги А. Эйнштейна, „Теория относительности“ (Петроград, 1922. Научное книгоиздательство).

¹⁾ А. Эйнштейн. Эфир и принцип относительности. Спб. 1921. Научное книгоиздательство.

ным поглощающим телом волны оказывают давление:

$$p = \frac{E}{c},$$

где E — энергия, падающая на 1 кв. сантиметр в секунду, c — скорость распространения волн. Существование светового давления на опыте впервые было обнаружено Лебедевым, при чем величина его оказалась как раз такой, которая следует из волновой теории света.

Понятие „массы“ не есть первоначальное понятие. Непосредственно мы ощущаем только давления, импульсы. Из импульса, давления мы определяем производное понятие массы, утверждая, по закону Ньютона, что импульс есть изменение количества движения или произведения массы на скорость:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = p.$$

Опыты с земными скоростями приводят нас к заключению, что множитель m , т. е. масса, при различных движениях остается постоянной. Это заключение точно, конечно, настолько, насколько точны наши опыты, более тонкий опыт может привести и к другому результату. Представим себе теперь, что мы, или наш прибор испытывает некоторое давление, которое мы измеряем, измеряем также скорость движения давящего агента. На основании написанного выше закона Ньютона мы сможем таким образом определить массу этого агента. Пусть мы производим опыт со светом, заставляя его падать на черную, поглощающую свет пластинку. Ско-

рость света при падении на пластинку будет c , поглощаясь в пластинке, свет останавливается, конечная скорость его равна нулю. С другой стороны, из опыта Лебедева мы знаем, что

$$p = \frac{E}{c}.$$

Подставляя эти данные в закон Ньютона, находим:

$$m_1 c - m_2 \cdot 0 = \frac{E}{c},$$

откуда, к нашему удивлению, определяем „массу“ света

$$m_1 = \frac{E}{c^2}.$$

Эту массу мы обязаны приписать свету, на том же „законном“ основании, как и камню и земле.

Таким образом то, что мы считали раньше чистой энергией, т. е. свет, обладает одновременно массой. Сделаем следующий смелый шаг. Мы знаем, что одна форма энергии может быть превращена полностью в другую, сохраняясь в своей величине. Свет может быть превращен в тепло, механическую работу, в электрическую энергию и т. д. Весьма вероятно поэтому, что и всем этим другим видам энергии мы тоже можем приписать массу:

$$m_1 = \frac{E}{c^2}.$$

В частности, если тело движется, т.е. обладает живой силой, кинетической энергией

$$E = \frac{m_0 \cdot v^2}{2},$$

то мы должны считать, что у тела появилась добавочная „кинетическая“ масса:

$$\frac{m_0 v^2}{2c^2}.$$

„Покоящаяся“ масса была m_0 , общая масса будет следовательно (приближенно):

$$m = m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2} = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right).$$

Выражение только приближенное, потому что во втором члене масса будет тоже зависеть от движения, а потому станет несколько больше m_0 . Мы получили таким образом формулу, совершенно согласную с формулой теории относительности, помимо этой теории. Эта формула оправдывается на опыте, а потому понятие „массы“ в физике нуждается в пересмотре.

4. Необходимость отклонения светового луча в поле тяготения предугадывалась еще с очень давних пор. Существование такого отклонения считал возможным между прочим Ньютон. Заканчивая свою „Оптику“, Ньютон предлагает целый ряд вопросов, подлежащих разрешению исследователя, и первым из них ставит следующий вопрос:

Вопрос 1. Не действуют ли тела на свет на расстоянии, заставляя лучи изгибаться, и не

будет ли при прочих равных условиях это действие тем больше, чем меньше расстояние? Это предположение Ньютона подтвердилось на опыте 29 мая 1919 г., т.е. более 200 лет после Ньютона. Этот колоссальный промах во времени — лишнее доказательство ненормальности исторического развития физики. Отклонение световых лучей при прохождении около солнца в наше время послужило, пожалуй, сильнейшим аргументом в пользу теории относительности и привлекло много сторонников на ее сторону. Но с таким же правом новый замечательный факт является аргументом в пользу теории материального истечения Ньютона. Мы уже видели (примечание 3), что свету приходится приписывать массу и в волновой теории, помимо теории относительности. Масса энергии, как показывают опыты с радиоактивными маятниками, является одновременно тяготеющей массой, а потому и в волновой теории света луч должен отклоняться от своего прямолинейного пути, проходя мимо тяготеющих масс. Величина этого отклонения вдвое меньше, чем следует из теории Эйнштейна. Наблюдения во время солнечного затмения 1919 г. не настолько еще точны, чтобы с уверенностью утверждать, что теория относительности подтвердилась количественно, для этого придется ждать новых наблюдений.

5. „Красное смещение“ спектральных линий в поле тяготения — неизбежное следствие теории относительности. Наблюдение до сих пор не дало еще подтверждения этому предсказанию теории. Дело идет о чрезвычайно тонких спектроскопических наблюдениях. Существует много факторов,

влияющих на смещение спектральных линий помимо тяготения. „Красное смещение“—предмет самых горячих споров до самого последнего времени среди астрономов и физиков. Определенного ответа, однако, нет. Если бы „красное смещение“ отсутствовало, это значило бы, что теория относительности—только приближенно верная теория, что ее „аксиомы“, т.-е. исходные факты, нуждаются в каких-то исправлениях. Наоборот, опытное подтверждение „красного смещения“ делает совершенно обязательной для физика всю систему уравнений теории относительности, оставляя по-прежнему „свободу истолкования“ исходных фактов. Физик может объяснить „красное смещение“, как результат неизвестного нам пока действия тяготения на частоту колебаний атома.

Проверка следствий теории на опыте—проверка ее исходных фактов. Истолкование этих фактов, повидимому, надолго останется предметом спора и вкуса.

б. Э. Мах, скончавшийся в 1917 г., в своей последней книге, появившейся в печати в 1921 г.: „Начала физической оптики“, категорически отклоняет от себя роль предтечи теории относительности. Отношение его к этой теории отрицательное.

О Г Л А В Л Е Н И Е.

Предисловие переводчика	СТР. 3
-----------------------------------	--------

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ.

Механические явления.

1. Введение	6
2. Почему всякое открытие возбуждает любопытство, а теория относительности особенно	9
3. Смысл теории относительности	12
4. Понятие пространства. Интерпретация <i>Канта</i> . Пространства различных измерений и различной кривизны	15
5. Понятие времени. Четырехмерный мир	21
6. Системы мира <i>Птолемея</i> и <i>Коперника</i>	30
7. Относительность пространства и времени. Относительность движения	33
8. Скорость. Принцип сложения скоростей. Изменение скорости. Ускорение. Инерция	39
9. Процессы в движущихся системах. Классический принцип относительности. Преобразование <i>Галилея</i>	48
10. Вращение. Объективные и субъективные признаки. Обруч. Волчок. Маятник <i>Фуко</i> . Вращающаяся жидкость. Попытка распространения классической теории относительности	51

- | | |
|---|----|
| 11. Внезапное изменение скорости. Ускоренное движение. Сила тяжести. Тяжесть и инерция эквивалентны | 61 |
| 12. Материя. Сила и масса. Тяготение. Ускоренное движение и постоянное силовое поле эквивалентны | 66 |
| 13. Истинный характер понятия массы. Масса—род энергии. Выводы | 71 |

ЧАСТЬ ВТОРАЯ.

Ф и з и к а э ф и р а .

- | | |
|---|-----|
| 14. Звук и свет. Теория истечения. Аберрация неподвижных звезд. Опыт <i>Араго</i> | 76 |
| 15. Волновая теория света. Эфир. Покой и движение эфира. Эффект <i>Доплера</i> . Опыт <i>Физо</i> | 81 |
| 16. Опыт <i>Микельсона</i> . Результат. Гипотеза сжатия <i>Лорентца</i> | 89 |
| 17. Скорость и распространение волн. Электромагнитная теория света. Польза и вред эфира | 99 |
| 18. Истинный смысл пространства и времени. Масштабы и часы. Марширующая колонна. Световые сигналы. | 104 |
| 19. Пространственно-временная картина мира. Специальная теория относительности. Отношение пространственных и временных отрезков | 111 |
| 20. Преобразование <i>Лорентца</i> . Постоянство скорости света. Перспектива времени. Мир <i>Минковского</i> | 119 |
| 21. Движущаяся и покоящаяся массы. Эквивалентность массы и энергии | 124 |
| 22. Специальная и общая теория относительности. Кривизна пространства. Искривление световых лучей | 128 |
| 23. Отклонение световых лучей солнцем. Аномалии орбиты Меркурия. Смещение спектральных линий в красную сторону спектра | 135 |
| 24. Выводы. Физика и философия | 140 |
| Примечания переводчика | 145 |