О. Д. ХВОЛЬСОН
ПРОФЕССОР ПЕТРОГРАДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА,
ПОЧЕТНЫЙ ЧЛЕН РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

А. ЭЙНШТЕЙНА

И НОВОЕ МИРОПОНИМАНИЕ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ

ИЗДАНИЕ М. и С. САБАШНИКОВЫХ
ПЕТРОГРАД
1923

Государственная типография имени Ивана Федорова,
Звенигородская, 11



1278
23

Петрообл. № 6671. Тираж 2000 экз.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первые два издания этой книги вышли, быстро одно за другим, осенью 1922-го года. С тех пор ничего не изменилось в той области сравнительно простых вопросов, которые могут быть изложены в общедоступной форме. Дальнейшее развитие общей теории относительности, весьма, впрочем, медленное, идет в чисто математическом направлении, доступном небольшому числу специалистов-теоретиков, главным образом— математиков и астрономов. Единственное новое событие, о котором мы, однако, ныне (июнь 1923 г.) еще не имеем точных сведений, заключается в том, что во время недавнего солнечного затмения, которое наблюдалось в западной части Североамериканских Штатов, вновь подтвердилось предсказание Эйнштейна об отклонении светового луча, проходящего вблизи поверхности солнца, под влиянием действия всемирного тяготения. Можно надеяться, что мы вскоре получим детальное описание произведенных наблюдений и полученных результатов.

Литература, посвященная принципу относительности, продолжает расти, и притом на всех культурных языках. Рядом с неимоверно бо́льшим числом все новых и новых попыток популярного изложения этого принципа, появляются обширные критические его разборы. Часть их исходит из лагеря философов, сильно заинтересовавшихся теорией Эйнштейна, в особенности ее отношением к проблемам гносеологическим и к вопросу о новом миропонимании. Вышла целая книга, содержащая собрание статей о теории Эйнштейна, написанных членами нового философского общества (в Германии), разрабатывающего новую философию «Как будто» (Als ob), которую дал Вайрингер.

Продолжается борьба, иногда весьма резкая, за и против, главным образом — общего принципа относительности. Многие из нападок на этот принцип явно основаны на недоразумениях, на недостаточно глубоком проникновении в сложные рассуждения, лежащие в основе учения Эйнштейна, или встречающиеся на пути его развития или вывода различных результатов. Но имеются нападки и со стороны таких авторов,

которых нельзя заподозрить в непонимании общего принципа относительности и его математических основ. Эти нападки встречают отпор со стороны приверженцев Эйнштейна, доказывающих неправильность рассуждений его противников. Из спора постепенно выяснится истина.

О. Хвольсон

Июнь 1923 г.

Теория относительности А. Эйнштейна

§ 1. Введение. Изучая историю физики, мы замечаем, что научные работы, благодаря которым эта наука развивается и растет, бывают трех родов, отличающихся друг от друга не по существу, но по характеру тех последствий, которые они вызывают. По существу, или, скажем лучше, по методу возникновения, все эти работы, более или менее, одинаковы: ученые, долгим, кропотливым и настойчивым трудом, накопляют научный материал, открывают и изучают новые явления и новые закономерности путем наблюдений и опытов или при посредстве теоретических рассуждений, т.-е. математического анализа. Так именно постепенно складывается, растет и ширится научное здание. Огромное большинство научных работ относятся к первому из упомянутых трех родов; эти работы соответствуют как бы прибавке новых камней к тем многим тысячам, из которых это здание уже сложено. Ежегодно появляется в научных журналах более двух тысяч работ по физике, и их совокупностью определяется ежегодный рост этой великой и основной науки. Работы первого рода свободно укладываются в рамки уже существующей науки.

Однако, от времени до времени, в великие, но редкие моменты истории физики, появляются работы другого рода, творения гениальных людей, имена которых проходят «веков завистливую даль» и не забываются благодарным потомством. Весьма мало, или даже вовсе не затрагивая уже построенного научного здания, эти работы кладут рядом с ним новый фундамент для новой, иногда весьма обширной пристройки. Над этим фундаментом начинает возвышаться новый отдел науки, строится кропотливой работой многих ученых в течение долгого времени новый флигель, своею грандиозностью и значением иногда превышающий большинство всех ранее построенных. Про такие работы можно сказать, что с них начинается новая эпоха истории науки. Приведем несколько примеров такой кладки новых фундаментов. Сюда относится открытие Ньютоном закона всемирного

тяготения, этого фундамента теоретической астрономии и небесной механики. Далее, открытие Вольта электрического тока, Эрштедтом действия этого тока на магнитную стрелку и длинный ряд открытий величайшего физика-экспериментатора всех времен, Фарадея. Еще укажем на открытие метода спектрального анализа, приведшее к построению грандиозного здания астрофизики, к нахождению новых химических элементов и т. д.; на установку принципа сохранения энергии, раскрывшего новые широкие горизонты для понимания закономерностей, господствующих в области физических явлений, и на не менее важное открытие принципа возрастания энтропии (рассеяния энергии), показавшего, в каком направлении текут явления в окружающем нас мире, и давшего в руки ученых наиболее могущественное орудие для глубокого их анализа; наконец, укажем на открытие нашим Д. И. Менделевым периодической системы химических элементов. Из более новых, назовем открытия рентгеновых лучей, радиоактивных веществ и влияния магнитных и электрических сил на лучеиспускание светящихся тел; наконец, еще на электронную теорию, на теорию лучеиспускания, данную Планком, и на учение о строении атома. Каждое из перечисленных здесь открытий раскрыло новые, широкие горизонты для научной работы и сделалось фундаментом для нового отдела физики.

Однако, в истории науки можно отметить, хотя и в небольшом числе, еще более важные моменты, когда появлялись работы, имевшие стихийное, разрушающее действие, распространенное на значительные части научного здания, давно построенные и, казалось, незыблемые на вечные времена. От затронутых частей физики, можно сказать, камня на камне не оставалось, и на совершенно новом фундаменте приходилось все перестраивать и переоценивать. Это были моменты великих научных переворотов, полной перемены основных положений и взглядов, на которых строилась, которыми держалась часть науки, и которыми руководились ученые, иногда в течение долгого времени.

Само собою разумеется, что те камни, из которых состояло старое, погибшее здание, оставались при такой катастрофе нетронутыми, поскольку ими выражались факты, собранные, как сырой материал, иногда вековыми трудами. Но их смысл и значение, и то освещение, которое им давали основные взгляды и гипотезы, иногда существенно менялись. Ими можно было пользоваться и при постройке нового здания, но их приходилось иначе складывать, придавать им иную группировку, присоединять к ним те новые камни, к приобретению которых приводили новые взгляды и гипотезы, так что в результате получалось научное здание не только на новом фундаменте, но и с новыми очер-

таниями, ни по деталям, ни по стилю, ни по устройству не похожее на старое, разрушенное.

О таких переворотах говорят нам, напр., имена Коперника, Лавоазье, а также Фарадея, Максвелла и Герца. Коперник заменил геоцентрическое миропонимание, ставившее Землю в центре вселенной, новым — гелиоцентрическим, сделавшим Солнце царицей нашего маленького мира, одного из бесчисленных миров, ему подобных. Веками накопленные астрономические наблюдения, на основании которых была построена старая астрономия Птоломея, остались, конечно, нетронутыми, но из них было сложено новое здание — астрономия Коперника, Кеплера, Ньютона, Лапласа и Леверье. Под влиянием новых идей великого Лавоазье рухнула старая химия с ее флогистоном, этим огненным веществом, которое выходит из металлов при их окислении.

Под натиском смелых идей Фарадея, гениальной теории Максвелла и бессмертных опытов Герца развалилось то чудное здание оптики Гюйгенса и Френеля, которым гордилась наука девятнадцатого столетия и которая была построена на гипотезе, что сущность света заключается в чисто механических колебаниях частиц упругой мировой среды, названной эфиром. Было построено здание новой оптики, не только на новом фундаменте, которым служила мысль, что свет есть явление электромагнитное, но и на новом месте, рядом с обновленной наукой об электричестве, так что оба учения слились в одно стройное целое, в котором оптика являлась уже только отделом, флигелем, одного, общего для электрических, магнитных и оптических явлений, научного здания. Не стояло оно и двух десятилетий, как пришлось подвергнуть его, хотя и не ломке, но все же коренному ремонту, основательной, местами, перестройке, под влиянием тех новых идей, которые внесла в науку электронная теория.

В недавнее время мы вновь переживали, а отчасти еще переживаем ломку старого научного здания, но такую ломку, каковой не знает история науки; она по обширности и основательности далеко оставляет за собою все те прежние, которые были нами приведены в виде примеров. Эта ломка, этот грандиозный научный переворот прежде всего замечателен тем, что он затрагивает почти все отделы физики. Лишь немногие части великого научного здания, сооруженного работой нескольких столетий, остаются в прежнем их виде. Но это еще не все! Разрушается не только старая наука, составляющая достояние сравнительно немногих, но в корне переиначиваются самые основные, элементарнейшие представления обыденной жизни, с которыми мы свыклись с малолетства, которые казались не подлежащими никакой критике, никаким колебаниям или сомнениям. Приходится отказываться даже от таких

истин, которые никогда и никем не высказывались, не подчеркивались, потому что они казались самоочевидными, и потому, что ими пользовались все и клали их в основу всевозможных рассуждений. Сюда относится, главным образом, неслыханный по своей смелости новый взгляд на время, на пространство и, в связи с последним, на размеры и на форму тел. Параллельно с ломкой старого, произошла постройка нового научного здания, по красоте и внутренней гармонии имеющего мало себе подобных. Однако, главная заслуга того нового учения, которому посвящены эти строки, заключается в том, что оно дало человечеству новое миропонимание, гораздо более глубокое и полное, чем то, которое связано с именем Коперника.

§ 2. А. Эйнштейн и две части его принципа относительности. Имя Альберта Эйнштейна принадлежит ныне к наиболее известным и почитаемым на земном шаре. Его несомненно следует признать не только за величайшего современного ученого, но и за одного из тех гигантов научной мысли, которые играли совершенно исключительную роль в тысячелетней истории научной творческой работы. Эвклид, Архимед, Кеплер, Галилей и Ньютон — вот те имена, рядом с которыми ныне ставят имя Эйнштейна. В течение более двухсот лет Ньютон считался величайшим ученым, когда-либо жившим, и никогда никто не удостаивался чести быть поставленным на одинаковой с ним высоте. А в настоящее время сами англичане, весьма щепетильно относящиеся к славе своих великих ученых, ставят Эйнштейна рядом с Ньютоном. В Англии вышла книга под заглавием «От Ньютона до Эйнштейна», в которой эти два имени выступают, как величины одинакового порядка.

А. Эйнштейн родился в 1879 г., так что ему теперь (1922) 43 года. Он был сперва профессором в Цюрихе, затем в Праге и опять в Цюрихе, а в настоящее время он профессор университета в Берлине и член Германской Академии Наук. Он подарил науке длинный ряд работ, относящихся к весьма различным отделам физики. На всех этих работах ярко выступает печать гениальности. Для примера можно указать на одну его небольшую статью о теплоемкости, которая вызвала грандиозную эволюцию соответствующего отдела физики и сделалась исходною точкой для несметного числа экспериментальных и теоретических исследований. Однако, великую славу доставили Эйнштейну работы по принципу относительности. Его имя стало известно всем, кто на земном шаре читает газеты, когда в ноябре 1919 года оправдалось его предсказание об отклонении светового луча, исходящего от какой-либо

звезды и проходящего мимо Солнца, на недалеком от него расстоянии.

Вся работа Эйнштейна распадается на две части. Первая часть появилась в 1905-м году; она дала то, что ныне называется специальным или малым принципом относительности. Вторая часть, над которой Эйнштейн работал в течение десяти лет, приняла ясные формы в 1915 г. Она дает нам так называемый общий или большой принцип относительности.

Уже первая часть произвела глубокий переворот почти во всех отделах физики. Она в корне изменила ту механику Ньютона, которая господствовала в течение двух столетий; пришлось отказаться даже от основных положений этой механики, выраженных всем известными тремя законами движения (leges motus). Она совершенно преобразовала понятия о размерах и форме тел, и, в особенности, — о времени. Она заставила нас отказаться от таких элементарнейших представлений, к которым мы привыкли с того момента, как мы научились говорить Вместе с представлением о пространстве и времени, изменились и понятия о скорости, силе и массе, оказались неверными такие элементарные вещи, как, напр., закон сложения скоростей.

Но еще радикальнее влияние второй части работы Эйнштейна, т.-е. общего принципа относительности. Эта часть дает нам новое миропонимание; она разгадала тайну мирового пространства, тайну всемирного тяготения и, что особенно удивительно, сделала из геометрии — отдел физики!

Изучить новую науку Эйнштейна, понять ее — представляет огромные идейные и, если можно так выразиться, технические трудности. Последние являются следствием того, что в теории Эйнштейна применяется такой отдел математики, с которым специалистам по физике никогда не приходилось встречаться. Чтобы вникнуть в идейную сторону нового учения, требуется долгая, настойчивая работа и своего рода насилие над самим собою. Надо заставить себя заменять привычные представления, с детства вошедшие в нашу плоть и кровь, другими, иногда резко противоречащими тому, что, далеко не всегда правильно, принято называть здравым смыслом.

Последнее относится, в особенности, ко многим выводам, к которым приводит учение Эйнштейна; характерною чертою этих выводов является неслыханная их парадоксальность. Если требуется не мало усилий и продолжительная работа, чтобы вдуматься в основы нового учения, то еще несравненно труднее принять, если можно так выразиться — переварить, упомянутые вытекающие из него парадоксы. Пока, новым учением занимаются еще немногие люди науки, и не мало им прихо-

дится работать, вдумываться, отказываться от весьма многого, к чему они привыкли, и мало-по-малу приучать себя мыслить и рассуждать по новому. Если бы новые идеи добились всеобщего признания и пришло бы время сделать их обязательным достоянием всех образованных людей, то человечеству пришлось бы пережить такой интеллектуальный переворот, сравнительно с которым упомянутый нами переход от геоцентрического миропонимания к гелиоцентрическому показался бы совершенно простым и ничтожным.

Однако мы можем с уверенностью сказать, что новое учение не скоро сделается общим достоянием, и вот по какой причине. В упомянутых выше случаях великих научных переворотов разница между старым и новым была громадная, не только по существу основных воззрений, но и по осязательности результатов. Кроме того, переход от старых идей к новым был сравнительно прост; задача вдуматься в новое и начать мыслить и рассуждать по новому не представляла чрезмерных затруднений. Современный же переворот характерен тем, что разница между новым и старым, громадная в области отвлеченного мышления, совершенно неосязательна на практике. Дело в том, что количественные изменения, вводимые новым учением в численные значения всевозможных физических величин, зависят от скорости, с которой тела движутся. Если эта скорость мала сравнительно со скоростью света (300,000 километров в секунду), то упомянутые изменения оказываются неизмеримо малыми. Но все скорости, с которыми мы встречаемся на земной поверхности, ничтожно малы сравнительно со скоростью света. Это относится даже к скоростям небесных светил, редко превышающим 100 километров в секунду. Скорость Земли при ее движении вокруг Солнца (30 км. в сек.) в 10000 раз меньше скорости света. К этому нужно прибавить, что новое учение дает для многих величин такие изменения, которые зависят не от весьма малого отношения скорости тела к скорости света (одна десятитысячная для скорости Земли), но от квадрата этой маленькой дроби, то-есть, от числа, которое получается, если эту дробь помножить самое на себя (одна стомиллионная для скорости земли). Измерить такие изменения возможно лишь в очень редких случаях, а потому — практически все остается по старому. Мы сказали, что старая механика Ньютона разрушена, и это верно, ибо ее фундамент, ее основные положения должны быть изменены. Но эти изменения, при обычных условиях, оказываются незаметно малыми, так что практически она остается неизмененной, и астрономы, инженеры, архитектора и т. д. никогда не перестанут ею пользоваться, как безошибочной основой

своих рассуждений и вычислений. Впрочем, для астрономии, в особенности, когда она занимается вопросами, относящимися не только к нашей маленькой солнечной системе, но к миру неподвижных звезд и туманных пятен, или вообще вопросами космологического характера, новые идеи о пространстве и о времени должны иметь первостепенное значение, как это будет видно из дальнейшего.

Только в области электрических и радиоактивных явлений мы встречаемся со скоростями, не только не малыми сравнительно со скоростью света, но даже весьма к ней близкими, и в этой области новое учение предсказывает результаты, весьма существенно отличающиеся от того, что можно ожидать на основании старой механики Ньютона, Мы имеем в виду электроны, эти атомы отрицательного электричества, которые, напр., выбрасываются некоторыми радиоактивными веществами и обладают скоростью, почти равною скорости света. Но изучение этой области физических явлений надолго, а может быть и навсегда останется достоянием сравнительно небольшого числа ученых; его результаты вряд ли скоро проникнут в широкую публику, и в этом заключается причина того, что величайший из всех научных переворотов разыгрывается как бы за кулисами общеизвестных событий и вряд ли скоро появится на той сцене, с которой должен быть знаком всякий образованный человек.

Однако, истинное значение всякого рода новых мыслей вовсе не определяется только теми практически осязательными результатами, к которым они приводят. Если эти мысли верны, если в них отражается реально существующее, то они должны предствавить огромный интерес для всякого, кому дорог прогресс понимания окружающего нас мира, возникновение нового миропонимания, как бы ни были отвлеченны новые завоевания человеческой мысли и неосязательны их результаты.

Следующее важное замечание окажется, вероятно, не бесполезным для читателя. Автору этих строк многократно приходилось беседовать с интеллигентными лицами, не физиками и не математиками, которые читали популярные статьи или слушали популярные лекции о принципе относительности. Весьма многие из этих лиц указывали, что они ничего понять не могут по той причине, что они не могут себе представить многих вещей, о которых говорится в принципе относительности. Выражаясь вульгарно, можно сказать, что здесь — собака зарыта.

Безусловно необходимо пересилить себя, необходимо заставить себя отказаться от всяких бесплодных попыток представить себе некоторые из выводов принципа относительности. И это вовсе не так уже

трудно, ибо смысл этих выводов можно уразуметь, если судить по аналогии, и наша задача будет, между прочим, заключаться в том, чтобы развить эту аналогию. Если читатель будет настаивать на том, что понятно только то, что можно себе более или менее ясно представить, то цель этих строк не будет достигнута. Но если удастся разъяснить упомянутую аналогию и тем самым дать читателю возможность отказаться от категорического требования ясного представления некоторых определенных выводов принципа относительности, то перед читателем станет вырисовываться картина результатов, к которым приводит учение Эйнштейна, а вместе с тем и новое, на нем основанное, миропонимание. Сказанное относится, главным образом, к общему принципу относительности.

§ 3. Покой и движение. Слова «абсолютный» и «относительный» применяются в обыденной речи, и их смысл ясен и понятен всем. Мы называем абсолютным все то, что верно безусловно, безотносительно к чему-либо другому. Относительным мы называем все то, что условно справедливо, что верно по отношению к чему-либо одному, но может быть неверно по отношению к чему-либо другому. Нет надобности приводить много примеров из обыденной жизни. Понятия, с которыми имеют дело наука о нравственности (этика) и наука о прекрасном (эстетика), большею частью, а может быть и все, суть понятия относительные. Если говорят, что на Урале находится «высокая» гора, то это значит, что она высока по отношению к другим горам того же горного хребта; но она маленькая гора по сравнению с Монбланом, который, со своей стороны, не представлялся бы высоким, если бы он находился в Гималайских горах.

Можно привести не мало примеров таких понятий, которые когда-то считались абсолютными, и которые впоследствии оказались понятиями относительными. Так, напр., покой Земли когда-то считался абсолютным, что, как мы теперь знаем, неверно. Другой пример представляет понятие о направлениях «вверх» и «вниз», которые казались абсолютными. Теперь мы знаем, что если мысленно продолжить направление «вниз» через центр Земли до противоположной части ее поверхности, то оно окажется направлением «вверх». Даже в двух, недалеких друг от друга, точках земной поверхности эти направления неодинаковы, как это всем известно.

Лучший пример чего-то относительного представляют нам понятия о покое и о движении. Мы на земной поверхности окружены различными предметами, из которых некоторые находятся в покое, дру-

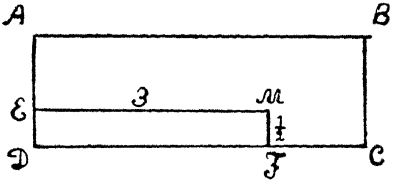
гие — движутся. Ясно, что мы здесь имеем дело с покоем и движением относительно Земли, которая со всеми находящимися на ней предметами вращается вокруг оси и движется вокруг Солнца. Когда мы находимся в вагоне железнодорожного поезда или в каюте едущего парохода, мы видим около себя предметы в покое и в движении, также, очевидно, относительных.

Возникает важный вопрос: можно ли, вообще, говорить об абсолютном покое и об абсолютном движении? Можно ли, прежде всего, указать случаи абсолютного покоя или движения? На этот вопрос мы должны ответить: нет, это невозможно. Действительно! Земля движется вокруг Солнца; но и Солнце со всеми окружающими его планетами, их спутниками и кометами движется, и в настоящее время можно уже указать то созвездие, по направлению к которому движется вся наша солнечная система. Все звезды, доступные нашему наблюдению, вместе с Млечным Путем, составляют ту звездную систему, в состав которой входит наше Солнце. Но подобными же звездными системами представляются те многочисленные туманные пятна, которые мы наблюдаем на небесном своде, и которые иногда отличаются весьма странною, напр., спиралевидною формою. Мы не можем сомневаться в том, что и звездные системы движутся, т.-е., что с течением времени меняется их относительное расположение. Итак все, что доступно нашему наблюдению, все, что во вселенной находится, несомненно движется. Ясно, что мы не можем указать на какой-либо пример абсолютного покоя, а следовательно — и на какой-либо пример абсолютного движения. Оставаясь в нашей звездной системе, мы нередко именно к ней относим покой и движение. Уже было упомянуто, что мы характеризуем движение нашей солнечной системы, указывая то созвездие, к которому направлено ее движение. То же самое относится к движениям некоторых из т. наз. «неподвижных» звезд, которые, хотя и весьма медленно, из года в год, меняют свое положение относительно других, окружающих их звезд. Несомненно и эти последние движутся, но столь медленно, что необходимы тысячи и десятки тысяч лет, чтобы можно было заметить изменение их взаимного расположения.

Если нет возможности указать на фактически существующие примеры абсолютных покоя и движения, то возникает особенно важный для нас вопрос: можем ли мы вообразить, представить себе абсолютные покой и движение? С первого взгляда может показаться — почему же нет? Почему бы не представить себе покоя и движения абсолютных, т.-е. безотносительных к чему-либо, находящемуся в пространстве, которое назовем абсолютным? Однако, легко убедиться, что мысль об абсолютном покое или таковом же движении в каком-то

«абсолютном пространстве» есть абсурд, нелепость, — и чем глубже вдуматься в этот вопрос, тем яснее это для нас становится.

Постараемся это выяснить и поставим прежде всего вопрос о том, *что* мы называем покоем и движением. Как мы узнаем, находится ли какой-либо предмет в покое или в движении? Очень просто: мы говорим, что предмет находится в покое, если он не меняет своего *положения*; он движется, если его положение меняется. Но что означает слово «положение»? Как определяется положение предмета или, просто, точки? Легко это выяснить на немногих примерах. Положим, что $ABCD$ (черт 1) представляет горизонтальную, четырехугольную поверхность стола, и что в M находится какой-либо маленький предмет. Чтобы определить положение предмета M *на столе*, мы измерим его расстояния ME и MF от двух краев AD и DC стола; положим, что первое равно трем аршинам, а второе — полуаршину. Если мы эти два числа запомнили или записали, то мы, уйдя и возвратившись, хотя бы через долгое время, легко можем узнать, остался ли предмет M за это время в покое, или его кто-нибудь сдвинул. Для этого мы отмерим вдоль края DC стола расстояние DF, равное трем аршинам, и затем, перпендикулярно к DC, расстояние FM, равное полуаршину. Таким образом, мы вновь придем в прежнюю точку M, и узнаем, сдвинут ли предмет, или нет. Мы можем сами унести наш предмет, а затем, только что указанным способом, поместить в то же самое место, где он находился раньше. Выражаясь короче, мы скажем, что *определенное положение на поверхности стола может быть вновь найдено указанным способом*.



Черт. 1.

Предположим теперь, что какой-нибудь предмет, напр., объектив (переднее стекло) зрительной трубы, находится в определенном месте свободного пространства комнаты. Как определить положение этого предмета? Для этого мы обратимся к двум смежным стенам и к полу этой комнаты. Чтобы определить *положение* какой-либо точки M, мы измерим расстояния точки M от двух стен (напр., 5 аршин и 3 аршина), и от пола комнаты (напр., 2 аршина). Если мы эти числа запомнили или записали и если мы наш предмет унесли, то мы можем его вновь установить в прежнем месте M, если мы вдоль второй стены отмерим расстояние в 5 арш.; затем перпендикулярно к этой стене, вдоль пола, расстояние в 3 аршина, и, наконец, от пола вертикально вверх, расстояние в 2 аршина; тогда мы вновь найдем прежнюю точку M.

Итак, определенное положение в пространстве может быть вновь найдено. В первом примере мы определяли положение точки относительно двух краев стола; во втором — относительно двух стен и пола комнаты. Подобным же образом мы поступаем всегда, когда желаем определить положение предмета: мы относим это положение к чему-либо, что, в данном случае, представляется нам неподвижным, и относительно чего мы затем решаем вопрос о покое или движении рассматриваемого предмета. Так, на земной поверхности мы определяем положение точки ее географическими широтой и долготой, т.-е. угловыми расстояниями: от экватора, считаемым по меридиану, и от нулевого меридиана, считаемым по параллельному кругу. Если широта и долгота известны, то мы можем точку вновь найти, как на самой земной поверхности, так и на глобусе или на географической карте. Покой или движение предмета, о которых мы узнаем, смотря по тому, сохраняется ли положение предмета или нет, очевидно, суть покой и движение относительные, а именно относительно тех вещей, которыми мы пользовались для определения положения предмета (края стола, стены и пол комнаты, экватор и нулевой меридиан), и которые мы приэтом считаем неподвижными.

Обратимся, теперь, вновь к тому «абсолютному» пространству, в котором мы ищем абсолютный покой и абсолютное движение. Так как покой и движение должны быть абсолютными, т.-е. безотносительными к чему-либо, мы, прежде всего, должны мысленно убрать из этого пространства все, что в нем находится, чтобы не впасть в невольную ошибку, относя покой и движение к предметам, оставшимся в пространстве. Итак, устраним мысленно из пространства Землю, Луну, Солнце, планеты с их спутниками, кометы, все звезды, Млечный Путь и все звездные туманности. Но это еще не все! Мы должны мысленно удалить из этого пространства и самих себя; мы должны думать об этом пространстве, как о чем-то находящемся вне нас, как будто мы на него смотрим откуда-то извне. Вообразим себе в этом пространстве хотя бы маленький шарик. Что означают покой и движение шарика? Это значит, что он не меняет или что он меняет свое положение. Но как же определить положение шарика в том абсолютном пространстве, в котором, кроме этого шарика, ничего нет? Все точки этого пространства совершенно одинаковы, их отличить друг от друга невозможно, и нет никакого способа вновь найти какую-либо точку, ранее нами отмеченную. Самое понятие о «положении» точки теряет всякий смысл. Вообразим себе, что мы видим наш шарик, затем как бы отвернулись и потом вновь посмотрим на него. Ясно, что мы никоим образом не можем определить, оставался ли шарик в покое, или он переместился. Можно

возразить: ну, а если мы видим, что шарик движется — разве это не будет движение абсолютное? На этот вопрос можно возразить следующее. Во-первых: если мы видим, что шарик движется, скажем — налево, то мы не можем знать, не представляется ли это нам так только потому, что мы сами движемся направо. Во-вторых: мы ведь условились мысленно и самих себя удалить из «абсолютного» пространства, чтобы избежать всякой относительности покоя и движения. Итак, мы в абсолютном пространстве не можем отличить покоя от движения. Отсюда ясно, что понятие об абсолютном покое и об абсолютном движении предмета, в воображаемом абсолютном пространстве, в котором ничего нет, кроме этого предмета — есть абсурд. Абсолютного покоя не только фактически нет, потому что все движется, но его и мыслить невозможно, так как его нельзя отличить от движения. Покой и движение могут быть только относительные, иначе их даже и мыслить невозможно.

Но и само абсолютное пространство, с которым мы здесь впервые встретились, представляется нам каким-то неуловимым призраком.

§ 4. Система. Принцип относительности Ньютона.

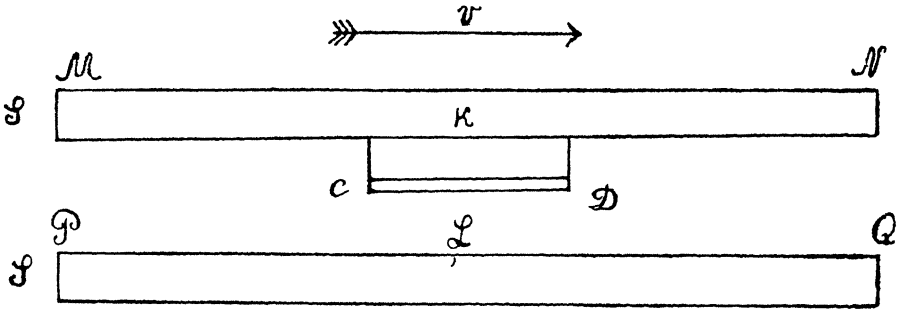
Мы назовем «системою» такое тело или такую совокупность многих тел, которая движется, как нечто целое, хотя внутри системы и могут происходить разного рода движения отдельных ее частей. Примерами могут служить поезд, корабль, вся Земля и т. д.

Для дальнейшего будет удобнее, если мы будем представлять себе систему в виде огромного ящика, вроде дома, разделенного даже на этажи и комнаты, и свободно двигающегося в пространстве. Далее, мы представим себе, что в такой системе находятся люди, которых мы назовем наблюдателями.

Допустим, что у этих наблюдателей находится богатый набор физических приборов, так что они имеют возможность производить всякого рода физические опыты, измерения и наблюдения. В их распоряжении находится также большое число идеально устроенных часов, обладающих совершенно одинаковым ходом и указывающих вполне одинаковое время. В некоторых случаях нам удобно будет представлять себе систему весьма длинною.

Систем может быть сколько угодно. Все системы движутся независимо друг от друга, и в каждой находятся свои наблюдатели со своими инструментами и часами. Допустим пока, что имеются две системы; для удобства, и чтобы не повторять одни и те же определения, мы обозначим эти системы буквами S и S', а соответствующих им наблю-

дателей через A и A'. Системы могут двигаться, как угодно Но во многих случаях мы будем предполагать, что две системы движутся по двум путям, близким друг другу, наподобие, напр., двух поездов, катящихся по двум параллельным парам рельсов одной и той же дороги. На черт. 2



Черт. 2.

изображены такие две длинные системы S и S'; значение части CD будет указано ниже.

Представим себе в системе S' какое-нибудь тело M, принадлежащее ей, а потому и движущееся вместе с ней. Наблюдателю A' в системе S, понятно, покажется, что тело M неподвижно, как нам представляется неподвижной гора, хотя она движется вместе с нами, принадлежа, как и мы, к одной системе S'', роль которой, в этом случае, играет земной шар. Мы допустим, однако, что наблюдатель A, находящийся в другой системе S, также может наблюдать тело M; оно, очевидно, представится ему уже не покоющимся, но движущимся, если только обе системы S и S' не обладают вполне одинаковым движением, каковой случай мы совершенно исключаем, полагая, что S и S' движутся различно. Если бы они двигались одинаково, то они составили бы всего одну, общую систему.

Относительная скорость двух систем—эта та скорость, с которою, напр., S' удаляется от S и которую замечает наблюдатель A', находящийся в S', или та скорость, с которой S удаляется от S' и которую замечает наблюдатель в S. Отсюда ясно, что относительная скорость имеет сразу как бы два противоположных направления, ибо, если наблюдатель A в S видит, что S' уходит, с некоторою скоростью, по направлению на восток, то наблюдателю A' в S' покажется, что S удаляется от него, с тою же скоростью, на запад. Направление относительного движения делается вполне определенным, если мы укажем ту из двух систем, скорость которой относительно другой мы имеем

в виду На черт. 2 верхняя стрелка указывает ту скорость v, с которою система S' движется, относительно системы S, слева направо.

В дальнейшем, пока мы не обратимся к общему принципу относительности, мы введем следующее, весьма важное и существенное упрощение, а именно, мы предположим, что относительное движение систем S и S' есть движение прямолинейное и равномерное, т.-е., что скорость v не меняется ни по величине, ни по направлению. То же самое мы будем предполагать, если мы будем рассматривать много систем: все они движутся друг относительно друга прямолинейно и равномерно.

Уже в механике Ньютона играет важную роль старый принцип относительности, который можно назвать ньютоновским. Он заключается в следующем: законы механики совершенно одинаковы, как в системе покоящейся, так и в системе движущейся равномерно и прямолинейно. Это значит, что все физические явления, которые объясняются механически, т.-е. сводятся к движениям и к действиям сил, протекают совершенно одинаково в обоих случаях. Все системы, движущиеся прямолинейно и равномерно, как бы равноценны, т.-е. между ними нет ни одной, которая имела бы какое-либо преимущество перед другими. Физика, поскольку рассматриваемые ею явления имеют механический характер, одна и та же во всех указанных системах. Это можно выразить иначе. наблюдатель, находящийся в какой-либо системе S, не может заметить ее равномерного и прямолинейного движения и, тем более, не может определить скорость этого движения путем каких бы то ни было наблюдений над физическими явлениями, совершающимися в этой системе S и имеющими механический характер. Даже если он заметит, что какое-либо тело M движется равномерно и прямолинейно мимо системы S или внутри ее, то и это не даст ему никаких указаний относительно собственного движения системы S, ибо наблюденное движение может быть результатом бесконечно разнообразных, по величине и по направлению, движений системы S и тела M.

Правильность старого принципа относительности явствует хотя бы уже из того, что механика Ньютона ведь была установлена на Земле, причем на движение Земли не было обращено никакого внимания. Это движение не входит в ее формулы, в ее законы. В вагоне поезда или в каюте корабля господствуют те же физические законы, наблюдаются те же физические явления (с выше указанной оговоркой), как и в неподвижном здании, в котором устроена физическая лаборатория.

Для дальнейших наших рассуждений представляет большой интерес вопрос об определении скорости звука в воздухе, когда этот воздух

не связан с тою системой, в которой наблюдатели производят свои измерения. Чтобы подойти к этому вопросу, рассмотрим сперва один простой случай относительного движения. Положим, что мы находимся в вагоне пассажирского поезда, который стоит неподвижно, и что мимо него движется полным ходом курьерский поезд. Обозначим через w скорость этого поезда, т.-е., напр., число сажен, которое он пробегает в одну секунду; ясно, что он пройдет мимо нас с этою скоростью w. Теперь предположим, что мы сами едем полным ходом со скоростью, которую обозначим через v, и притом навстречу курьерскому поезду. В этом случае последний, очевидно, пролетит мимо нас с относительною скоростью, равною сумме скоростей w и v, т.-е. с большею скоростью $w+v$, и если бы мы не знали о том, что мы сами едем, то нам показалось бы, что курьерский поезд обладает скоростью $w+v$. Допустим, наконец, что оба поезда едут в одном направлении и что курьерский поезд нас догоняет. Он, очевидно, проедет мимо нас с относительною скоростью, равной разности скоростей w и v, т.-е. со сравнительно малою скоростью $w-v$, и если бы мы опять не замечали своего движения, то нам показалось бы, что курьерский поезд движется с этою малою скоростью $w-v$.

Обратимся теперь к вопросу об измерении скорости звука в воздухе внутри системы S, предполагая, что наблюдатели A имеют все приборы, чтобы определить скорость w звука между двумя точками P и Q, расположенными внутри системы S так, что прямая PQ имеет направление движения этой системы; скорость движения системы S обозначим через v. Тут возможны два случая.

Положим сперва, что воздух, наполняющий систему S, связан с нею, что сама система представляет, напр., лабораторию, все стены которой целы, окна и наружные двери закрыты. Ясно, что в этом случае наблюденная скорость звука совершенно не зависит от скорости системы S, и что звук в одинаковые времена пройдет путь от P к Q и от Q к P. Измерение скорости звука ничего не откроет наблюдателю относительно скорости v движения системы S, в которой он находится. Движение Земли вокруг Солнца, понятно, никакого влияния не имеет на скорость распространения звука в нашей атмосфере.

Нечто совершенно другое получится, если предположить, что система S движется в неподвижном воздухе, причем две стенки лаборатории, передняя и задняя, вынуты, или — что воздух свободно движется (ветер) через неподвижную лабораторию. Оставим в стороне возможность определения факта относительного движения воздуха и системы S ощущением ветра или движением легкоподвижных тел, и даже возможность измерения относительной скорости воздуха при помощи, напр.,

анемометров, т.-е. приборов, которыми пользуются на метеорологических обсерваториях для измерения скорости ветра. Легко сообразить, что наблюдатель, измеряя сперва время, в течение которого звук распространится от P до Q, а потом от Q до P, получит неодинаковые результаты, а потому он и для величины скорости звука, т.-е. для расстояния, которое звук проходит в одну секунду, найдет различные числа. Действительно, положим сперва, что лаборатория S движется через неподвижный воздух со скоростью v по направлению прямой, проведенной от P к Q. Скорость w_1 звука, идущего от P к Q, окажется равною $w_1 = w - v$, ибо звук, вышедший от P, должен догонять точку Q; скорость w_2 звука, идущего от Q к P, будет равна $w_2 = w + v$, так как точка P движется навстречу звуку, вышедшему из точки Q. Измерив две скорости звука w_1 и w_2, наблюдатель легко вычислит отдельные величины w (полусумма скоростей w_1 и w_2) и v (полуразность скоростей w_1 и w_2), т.-е. он узнает не только истинную скорость w звука в покоящемся воздухе, но и скорость v своего движения относительно наружного воздуха, который мы считаем неподвижным *).

Однако, совершенно тот же результат получится, если лаборатория S неподвижна, а воздух проходит через нее со скоростью v по направлению обратному, т.-е. от Q к P. В этом случае звуковые волны увлекаются воздухом, и для скорости w_2 звука, распространяющегося от Q к P, мы опять получим $w_2 = w + v$, а для скорости w_1, от P к Q, как прежде, величину $w_1 = w - v$, ибо звуковые волны уносятся воздухом назад. Из сказанного следует, что неодинаковость скоростей звука в двух друг другу противоположных направлениях дает наблюдателю возможность определить только относительную скорость лаборатории и воздуха, но оставляет открытым вопрос, движется ли лаборатория в спокойном воздухе, или воздух через неподвижную лабораторию, или движутся оба, но с различными скоростями.

§ 5. Вопрос об эфире. Опыт Майкельсона. Старый принцип относительности Ньютона, с которым мы уже познакомились в § 4, гласит, что наблюдатели, находящиеся в прямолинейно и равномерно движущейся системе, не могут определить направление и скорость этого движения путем каких бы то ни было наблюдений над физическими явлениями, происходящими внутри этой системы, причем наблюденные явления должны, однако, сводиться к законам ньютоновской механики.

*) См. примечание 1 в конце книги.

Этому принципу отнюдь не противоречит то, что здесь было изложено относительно различных возможных случаев измерения скорости звука. Действительно, когда система S была закрыта со всех сторон, так что воздух представлял составную ее часть и двигался вместе с нею, измерение скорости звука и не давало никаких указаний относительно движения самой системы. Но когда мы мысленно удалили две стены системы S, и воздух свободно проходил через нее, то этот воздух уже не входил в состав системы, не двигался вместе с нею. Он оказывался внешнею, для системы S, средою, и опыты могли установить только величину скорости системы относительно этой внешней среды.

Однако, нам известно еще одно явление, во многом аналогичное распространению звука, и притом явление, о котором мы ныне знаем, что оно не имеет механического характера. Мы имеем в виду распространение света. В виду той огромной роли, которую сыграло это явление в истории возникновения нового принципа относительности, нам необходимо остановиться на некоторых вопросах, связанных с этим явлением.

До сравнительно недавнего времени, наука допускала, что все междузвездное пространство, а также все промежутки между молекулами обыкновенной материи заполнены особым веществом, которое называлось эфиром. Много было сделано попыток разгадать свойства этой мировой среды, сделать их наглядными и понятными. Ученые старались определить ее плотность, разгадать те движения, которые могут в ней происходить, и те упругие изменения, или деформации, которым она подвергается. Эти попытки не увенчались успехом; ученые приходили к самым противоречивым результатам, и тайна эфира не была разгадана. Однако, вопрос о свойствах, которые приписывались эфиру, для нашего дальнейшего изложения значения не имеет. Достаточно запомнить, что эфир считался передатчиком света, подобно тому, как воздух служит передатчиком звука. Нам только важно иметь в виду, что наука допускала существование эфира, что она без него обойтись не могла и в этом его существовании не сомневалась.

Мы знаем, что свет распространяется в «пустоте», напр., в междузвездном пространстве, со скоростью 300000 километров в одну секунду; обозначим эту скорость латинскою буквою c. Внутри прозрачных веществ скорость света меньше c, напр., в воде $\frac{3}{4}c$, в стекле $\frac{2}{3}c$. Число, которое показывает, во сколько раз скорость света в пустоте больше, чем в данном веществе, называется показателем преломления этого вещества. Если его обозначить латинскою буквой n,

то для воды $n = \frac{4}{3}$, для стекла $n = \frac{3}{2}$. Прежде всего мы должны рассмотреть вопрос о том, что происходит с эфиром, находящимся внутри обыкновенных тел, когда эти тела движутся. По этому вопросу были предложены три гипотезы, к которым, однако, в связи с новым принципом относительности, была предложена еще четвертая, весьма радикально устраняющая самую постановку вопроса. Эти гипотезы следующие:

1. Гипотеза Герца (H. Hertz): эфир вполне увлекается движущимися телами. Эта гипотеза была опровергнута многочисленными опытными и теоретическими исследованиями, так что от нее пришлось отказаться.

2. Гипотеза Лоренца (H. A. Lorentz): эфир совершенно неподвижен. Эфир, находящийся внутри движущихся тел, никакого участия в этом движении не принимает.

3. Гипотеза Френеля и Физо (Fresnel, Fizeau): эфир отчасти увлекается движущеюся материей. Это значит, что когда тело движется со скоростью v, то находящийся в нем эфир увлекается ею с некоторою скоростью v', которая меньше v. Френель дал формулу, при помощи которой легко вычислить v', если v дано. Так, для воды оказывается, что $v' = \frac{7}{16} v$; эта скорость прибавляется к скорости $\frac{3}{4} c$ света в неподвижной воде (см. выше), когда вода течет по направлению распространения света; она вычитается из скорости $\frac{3}{4} c$, когда вода течет по обратному направлению *). Физо произвел (1871) классический опыт, в котором он заставлял воду весьма быстро течь через две параллельно друг другу расположенные трубы, и притом в противоположных направлениях. Сравнивая скорости в обеих трубах, когда в одной лучи распространялись по направлению течения воды, а в другой против течения, он мог определить разность двух скоростей, которая оказалась вполне согласною с формулой Френеля. Тот же результат получили впоследствии Майкельсон и Морлей (Michelson, Morley, 1886). Однако, Лоренц показал, что его теория, предполагающая полную неподвижность эфира, также приводит к формуле Френеля, так что опыт Физо нельзя считать решающим вопрос в пользу теории частичного увлечения эфира движущимися телами.

Из изложенного явствует, что гипотезы первая и третья в современной науке роли не играют. Однако, к опыту Физо нам придется еще раз возвратиться (примечание 7, в конце книги).

---

*) Примечание 2.

4. Гипотеза Эйнштейна и Планка: никакого эфира не существует, если только предполагать, что эфир есть особого рода вещество, различные части которого имеют самостоятельное, реальное существование, так что можно мыслить определенное место в эфире. Как видно, эта гипотеза вовсе не отвечает на поставленный вопрос но в самом корне его устраняет. Мы увидим, что эта гипотеза находится в тесной связи с тем принципом относительности Эйнштейна, которому посвящена эта книга, и даже является неизбежным следствием, или, если угодно, частью или спутником этого принципа.

Допуская существование эфира, мы, как сказано, должны считать его совершенно неподвижным, не принимающим никакого участия в движениях обыкновенных тел. Из такой гипотезы вытекает, однако, немедленно одно, для нас весьма важное, следствие, а именно: если существует неподвижный эфир, как особого рода вещество, или даже если вообще существует эфир, который неподвижно заполняет междузвездное пространство, то должны существовать и тот абсолютный покой и то абсолютное движение, от которых мы выше сочли нужным отказаться.

Систему, которая неподвижна относительно эфира, мы имеем право считать находящейся в абсолютном покое; ее движение относительно эфира представляется нам движением абсолютным. Различные системы, движения которых друг относительно друга прямолинейные и равномерные, не находятся во вполне одинаковых условиях, и одна из них должна иметь некоторое преимущество перед другими, а именно та, которая находится в покое относительно эфира. Отсюда получается такое следствие: безусловно отказываясь от мысли о существовании абсолютного покоя и абсолютного движения, мы принуждены отказаться и от мысли о существовании эфира, как особого рода вещества.

Возвратимся мысленно к тому времени, когда наука твердо держалась гипотезы о существовании неподвижного эфира, в котором распространяются световые лучи, аналогично тому, как звук распространяется в воздухе, и вспомним то, что было сказано об измерении скорости звука в системе, движущейся в свободном, т.-е. с нею не связанном воздухе. Мы видели, что такое измерение дает нам возможность определить относительную скорость системы и воздуха.

Допуская, что эфир совершенно неподвижен, т.-е. вовсе не увлекается движущимися телами, мы вправе ожидать, что прямолинейное, равномерное движение системы должно отпечатлеться на явлениях распространения света.

которые наблюдаются в этой системе. Это не противоречит старому принципу относительности Ньютона, так как распространение света, хотя и наблюдаемое внутри системы, происходит, однако, в среде, не связанной с системой. Мы имели бы здесь нечто вполне аналогичное только что упомянутому измерению скорости звука. Если система покоится относительно эфира, то наблюдатели, измеряя внутри этой системы скорость распространения света, конечно, найдут величину $c = 300000$ километров. Если система движется навстречу лучу, то измеренная величина должна быть больше, а если она движется по направлению распространения луча, то измеренная скорость должна быть меньше указанной величины c. Такие измерения должны дать даже больше, чем измерения скорости звука, которые не давали возможности решить вопроса о том, движется ли наблюдатель в неподвижном воздухе, или воздух через неподвижную систему (лабораторию), или движутся оба, но с неодинаковыми скоростями. Для случая эфира эти сомнения совершенно отпадают: если опыты обнаружат относительное движение системы и эфира, то уже не останется сомнения в том, что система движется в эфире, а не эфир через систему.

Примем за такую систему нашу Землю, движение которой вокруг Солнца можно, за небольшой промежуток времени, считать прямолинейным и равномерным; скорость этого движения равна 30-ти километрам в секунду. Уже в семидесятых годах прошлого столетия возникла мысль определить абсолютную скорость Земли путем измерения скорости световых лучей, распространяющихся на земной поверхности в различных направлениях. Было бы желательно измерить на движущейся Земле скорость света, и притом в трех направлениях:

1. По направлению, перпендикулярному к направлению движения Земли, т.-е. ее скорости.

2. По направлению, совпадающему с направлением ее движения.

3. По направлению, прямо противоположному ее движению.

Измерения производятся в воздухе, но это никакого значения не имеет, так как скорость света в воздухе лишь весьма мало отличается от скорости в пустоте. Заметим, что, к сожалению, нет возможности отделить друг от друга измерения второе и третье, но все же оказывается возможным устроить опыт так, что движение Земли через эфир должно было бы обнаружиться.

В 1881-м году произошло одно из важнейших событий истории физики; оно тогда же обратило на себя внимание ученых и вызвало крайнее удивление и недоумение. Но никто не подозревал, в какой степени оно окажется чреватым необычайными последствиями, и что

оно приведет к существенной перестройке почти всей физики и подарит человечеству новое миропонимание. Американский ученый Майкельсон (Michelson) произвел в указанном году весьма остроумный опыт, давший возможность сравнить скорость света, распространяющегося параллельно движению Земли (туда и обратно), со скоростью света, распространяющегося по направлению, перпендикулярному к движению Земли (также туда и обратно). Весьма простое вычисление, т.-е. элементарная логика и здравый смысл, указывали, что в этом опыте должна обнаружиться разница двух скоростей распространения света и что по наблюденной разнице легко вычислить абсолютную скорость Земли в неподвижном эфире. К невыразимому удивлению всех, оказалось, что этот опыт никакого результата не дал. Это могло только означать, что свет распространяется с одинаковою скоростью по всем трем, выше указанным направлениям. Опыты были затем повторены еще два раза (1887 и 1905), в более грандиозном масштабе, причем ожидавшийся эффект почти в 200 раз превышал бы тот, который еще оказался бы заметным на тех приборах, которые служили ученым в этих опытах *).

Оказалось далее, что можно произвести еще целый ряд других опытных исследований, как над световыми, так и над некоторыми электрическими явлениями, которые, на основании простых и строго логических соображений, непременно должны были бы обнаружить движение Земли через эфир. Все эти опыты были фактически произведены, с величайшею тщательностью, многими учеными. Однако, все опыты дали отрицательный результат! Это было что-то непостижимое, несуразное, резко противоречащее элементарной логике и здравому смыслу. Такой результат представлялся неразрешимою загадкой. Земля ведь несомненно движется в пространстве, несомненно, как все полагали, наполненном неподвижным эфиром, передающим свет, как воздух передает звук. Относительное движение воздуха и наблюдателя, несомненно, легко обнаруживается, как выше было изложено. Почему же относительное движение Земли и эфира не производит никакого влияния на скорость света, наблюдаемую на Земле?

§ 6. Гипотеза Лоренца и Фицжеральда. Первая работа Эйнштейна; постулаты. Чтобы объяснить удивительный результат опыта Майкельсона, Лоренц (H. A. Lorentz) и Фицжеральд (Fitz-

*) Примечание 3.

gerald) предложили, независимо друг от друга, крайне странную гипотезу, заключающуюся в предположении, что размеры обыкновенных тел сами собой меняются, когда эти тела движутся в эфире, и притом по следующему правилу. линейные размеры (напр, длина, толщина и т. д.), перпендикулярные к направлению движения тела через эфир, не меняются; линейные размеры тела, которые параллельны движению, претерпевают, исключительно только вследствие этого движения, некоторое сокращение. Итак, по этой гипотезе, движущиеся тела укорачиваются по направлению движения. Это укорачивание чрезвычайно мало, когда скорость тела мала сравнительно со скоростью света. Положим, что длина стержня равна одному метру, когда его держат поперек направления движения Земли; если его повернуть так, чтобы его длина была расположена по направлению движения Земли, то он укоротится на пять миллионных долей миллиметра *). Само собою разумеется, что упомянутого изменения размеров невозможно было бы измерить даже и в том случае, если бы оно было гораздо больше, если бы, напр., длина уменьшилась до половины. Это ясно из того, что ведь все тела претерпевали бы одинаковое изменение размеров, а следовательно и наши метры, аршины, измерительные ленты и т. д. Оказывается, что гипотеза Лоренца и Фицжеральда могла бы вполне объяснить отрицательный результат вышеупомянутых опытов Майкельсона и других ученых. Однако, выход из затруднения, указанный гипотезой Лоренца и Фицжеральда, нельзя признать удовлетворительным. Трудно допустить, что размеры тел меняются в зависимости от их движения, и нелегко указать причины такого изменения, хотя, впрочем, Лоренц указал на возможную причину, исходя из мысли, что силы сцепления, действующие между молекулами вещества, суть силы электрические. Однако, здесь вводится новая гипотеза, так что это объяснение результатов опытов Майкельсона нельзя признать приемлемым.

И вот, в 1905-м году, появилась работа Эйнштейна, в которой изложен тот принцип относительности, который ныне называется специальным (или, иногда, — малым). Исходную мысль Эйнштейна можно выразить весьма просто. Мы только что видели, что несмотря на многочисленные и разнообразные попытки не удалось путем опытов обнаружить прямолинейного и равномерного движения Земли через эфир. Сущность теории Эйнштейна заключается в замене слов «не удалось» словами «не может удаться». Между этими двумя выражениями зияет пропасть.

---

*) Примечание 4.

„Не удалось“ — это простое констатирование исторического факта, неожиданного результата многочисленных опытных исследований, вызвавших величайшее удивление и недоумение. Этот факт можно попытаться объяснить, отыскивая возможные причины странного несогласия результата опытов с тем, что теоретически казалось безусловно верным и необходимым. Гипотеза Лоренца и Фицжеральда может быть рассматриваема, как смелая, хотя и мало приемлемая попытка такого объяснения.

„Не может удаться“ — это априорно выставленная аксиома, это постулат, положенный в основу нового миропонимания. Эти слова означают, что мир так устроен, что прямолинейное и равномерное движение системы в пространстве, ни при каких условиях и никакими наблюдениями, произведенными внутри системы, не может быть обнаружено. Мы имеем здесь не что иное, как расширение принципа относительности Ньютона (§ 4), который учил, что в прямолинейно и равномерно движущейся системе (напр., лаборатории) все физические явления происходят совершенно так, как в системе покоящейся. Но этот принцип не мог относиться к явлениям, происходящим в среде, относительно которой система движется, и мы легко убедились, что он неприложим к звуковым явлениям, происходящим в воздухе, несвязанном с самою системою. Новый принцип утверждает, что указанная невозможность распространяется на все явления, передатчиком которых считался эфир, а следовательно прежде всего к явлениям световым. Никакими наблюдениями над распространением света нельзя обнаружить прямолинейного и равномерного движения той системы, в которой находится наблюдатель. Это следует принять как постулат, ни о каком его доказательстве, ни о какой попытке его вывода из чего-либо уже известного или принятого, не может быть и речи. Но его, как мы увидим, можно заменить другим постулатом, также выражающим некоторое свойство нашего мира, скрытое от нас и недоступное непосредственному восприятию.

Специальный принцип относительности Эйнштейна основан на двух постулатах, из которых первый мы можем теперь формулировать таким образом: наш мир так устроен, что **никакими** наблюдениями, произведенными в произвольной системе, напр., на Земле, нельзя обнаружить прямолинейного и равномерного движения этой системы, и, тем более, определить скорости этого движения. Приняв этот постулат, мы должны на нем, как на новом

фундаменте, построить новую физику; далее, мы должны вывести всевозможные вытекающие из него следствия, и, если это окажется возможным, проверить на опытах справедливость полученных выводов. С первого взгляда может показаться, что новый принцип относительности, поскольку он выражен первым постулатом, весьма мало отличается от старого, ньютоновского, который только распространяется еще и на явления в эфире, прежде всего на явления световые. Но в действительности это, на вид небольшое, обобщение связано с величайшим переворотом в основных наших представлениях. И это делается понятным, если вспомнить, что эфир, если он существует, неподвижен, вроде того, как мы выше считали неподвижным воздух, в котором движется открытая с двух сторон лаборатория. Все наши основные понятия и так наз. «здравый смысл» безусловно требуют, чтобы движение системы в неподвижном эфире могло быть обнаружено путем наблюдений скорости света, распространяющегося через систему в различных направлениях. Наш постулат противоречит этому требованию, а потому и неудивительно, что вытекающие из него последствия привели к величайшему научному перевороту

Второй постулат Эйнштейна тесно связан с первым, так что некоторые ученые считают его за простое следствие, вытекающее из первого. Этот постулат гласит: где и при каких условиях ни измерялась бы скорость света в системах, относительное движение которых прямолинейно и равномерно, для нее всегда получается одна и та же величина c (в пустоте). Чтобы вполне понять значение этого постулата, и чтобы убедиться, в какой мере он, повидимому, противоречит элементарной логике, стоит только указать на два вытекающих из него следствия.

Во-первых, обращаемся к нашим двум системам, из которых S' движется со скоростью v относительно S. Эта скорость может быть громадна, напр., равняться 0,9 c, так что S' удаляется от S со скоростью, почти равною скорости света. В какой-нибудь точке прямолинейного пути испускается мгновенный световой сигнал, лучи которого проходят через обе системы. Наблюдатели A в S и другие наблюдатели A' в S' определяют скорость распространения этих световых лучей в соответствующих системах, и они находят одинаковую скорость c. И это остается верным, безразлично, идут ли световые лучи навстречу системе S', или им приходится догонять эту систему S'. Если допустить, что система S неподвижна в эфире, то скорость света в S должна была бы равняться c; но в S' мы были бы вправе ожидать, в первом случае, скорости света равной $c+v$, т.-е. в нашем примере ($v=0{,}9\ c$) скорость $c+0{,}9\ c=1{,}9\ c$,

а во-втором случае скорость света $c-0{,}9\ c = 0{,}1\ c$, а не c. Второй постулат говорит, что в обоих случаях наблюдается в S' скорость света, равная c.

Во-вторых, положим, что в двух точках P и Q системы S испускаются световые сигналы. Время, в течение которого свет распространяется от P к Q, с точностью равняется времени перехода света от Q к P, каково бы ни было состояние движения системы S, напр., когда она движется по направлению PQ или QP со скоростью, почти равною c. Конечно, против этого можно возразить, что мы здесь говорим о каком-то абсолютном движении, смысл которого не выяснен. Но и это возражение отпадает, если мы себе представим, что лучи исходят от двух внешних источников, из которых один расположен спереди, а другой — сзади системы S, так что лучи одного источника идут навстречу системе, а лучи другого ее догоняют. Пронизывая систему, одни лучи идут (напр., от P к Q) по направлению движения системы, а другие (от Q к P) против этого движения. Однако, и те и другие лучи обладают в системе S одинаковою скоростью c, хотя бы система S двигалась относительно двух источников света со скоростями $+0{,}9\ c$ и $-0{,}9\ c$.

§ 7. Понятие о времени в специальной теории относительности. Мы видим, что в системе, движущейся прямолинейно и равномерно, наблюдатели, измеряющие скорость света, получают одну и ту же величину, в каком бы направлении свет ни распространялся внутри этой системы. Этот постулат находится в теснейшей связи с учением Эйнштейна о времени и о размерах тел. Сам по себе этот постулат как будто противоречит элементарной логике и «здравому смыслу». Но Эйнштейн показал, что попранная логика может быть восстановлена в своих правах, и «здравый смысл» вполне может восторжествовать, если сделать смелый шаг: лишить время, а также размеры тел того абсолютного характера, который мы им, отчасти бессознательно, приписываем. Это шаг, гениальный по замыслу и чудовищный по своей смелости. Но в нем единственный возможный исход из той дилеммы, которая стоит перед нами, если мы примем упомянутый постулат, опирающийся, однако, на незыблемо установленный факт, доказанный опытами Майкельсона и других. Этот шаг переворачивает элементарнейшие наши представления, к которым мы привыкли с малолетства, которыми мы непрерывно пользуемся и которые мы никогда не считали нужным формулировать, убежденные в том, что они самоочевидны.

Начнем с представления о времени. Как мы представляем себе время? Несомненно, что мы представляем себе время, как нечто непрерывно и равномерно протекающее, с вечно и везде одинаковою скоростью. Одно и то же время течет во всем мире; это — мировое время, абсолютное, т.-е. безотносительное к чему-либо. Нет и, как казалось, быть не может двух времен, которые в различных местах вселенной текли бы по разным законам и, с первого взгляда, независимо друг от друга. Тесно связаны с этим наши представления об одновременности двух событий, о «раньше» и «позже». Эти элементарнейшие представления имеют ясный, определенный и одинаковый смысл для всех, кто бы ими ни пользовался; они доступны малому ребенку, понявшему слова «сперва» и «потом», когда ему, напр., говорят: «сперва умойся, потом будем кушать». Конечно, счет времени может быть неодинаковый в различных местах, т.-е., разделив непрерывный поток времени на равные части, сутки, мы начало суток устанавливаем в различных местах неодинаково. Но это мы делаем для удобства, и без труда мы могли бы себе представить и такой счет времени, при котором на всей земной поверхности часы показывали бы одинаковое время. Отчасти мы к этому уже приблизились, когда ввели напр., во всей западной Европе, в средней Европе и в Европейской России по одному счету времени. Но, независимо от такого условного счета времени, всем ясно, что означают слова «одновременно», «раньше» или «позже», отнесенные к двум событиям, происходящим где угодно. Обратимся к тем двум системам S и S', о которых мы говорили раньше, и относительное движение которых равномерное и прямолинейное. Если два события, напр., испускание двух мгновенных световых сигналов, происходят для наблюдателей A в системе S одновременно, то мы полагаем, что они и для наблюдателей A' в системе S' одновременны; если одно из событий происходит для наблюдателей A раньше или позже другого, то мы полагаем, что первое и для наблюдателей A' происходит, и притом на столько же секунд, раньше или позже, ибо мы представляем себе, что в S и в S' течет одно и то же общее, мировое, абсолютное время. Даже если из двух событий одно происходит на Земле, а другое на Сириусе, нам казались понятными представления о том, что эти два события произошли одновременно, или что первое произошло раньше или позже второго. И вот от всех этих элементарных, детских представлений мы должны заставить себя отказаться!

Все то, о чем только что было сказано, оказывается, по теории Эйнштейна, не только совершенно неверным, но даже лишенным всякого смысла. По этой теории никакого абсолютного, мирового

времени не существует. Каждая из двух, движущихся друг относительно друга, систем S и S' имеет свое, присущее ему течение времени, воспринимаемое и измеряемое наблюдателями, которые в этой системе находятся и вместе с нею движутся. На этом вопросе нам необходимо остановиться и разобрать его подробнее.

Положим сперва, что мы имеем одну систему S. На такой системе, движущейся, как целое, существует одно только время, общее всем ее точкам. Можно говорить об определенном моменте времени, одинаковом во всех частях системы. Вообразим себе, что в этой системе имеется большое число идеально построенных, совершенно одинаковых между собой часов. Можно добиться того, что все часы будут показывать одинаковое время. Посмотрим, как это сделать. Казалось бы, что простейший способ был бы следующий: собрать все часы в одно место, и здесь установить стрелки в одинаковое положение, после чего мы можем быть уверены, что часы, в виду их идеального устройства, уже всегда будут показывать вполне одинаковое время. Эти часы мы затем и перенесем в различные места системы S. Однако, такой способ представляется сомнительным, а потому и неприемлемым, ибо мы не можем быть уверены в том, что во время перемещения не изменяется ход часов. Предположение, что ход не изменяется, что пара вполне одинаковых часов, из которых одни движутся относительно других, идут одинаково — есть гипотеза, ни на чем не основанная. Здесь, конечно, не имеется в виду изменение хода вследствие каких-либо недостатков механизма часов; речь идет только о невозможности отрицать влияние относительного движения на ход пары часов.

Существуют, однако, другие способы добиться того, чтобы все часы, расположенные в различных местах одной и той же системы, напр., вдоль системы S или системы S' (черт. 2), показывали бы одно и то же время; но весьма важно отметить, что эти способы основаны на втором постулате, т.-е. на опытно доказанной независимости скорости света от того направления, в котором лучи распространяются в данной системе.

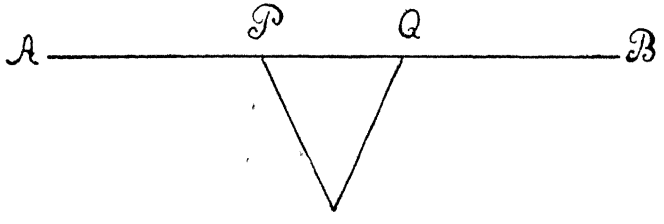
Первый способ заключается в следующем. Положим, что в двух точках A и B системы находятся часы. В точке, находящейся как раз по средине между A и B, дают мгновенный световой сигнал, который, на основании второго постулата, одновременно достигает точек A и B. Понятно, что это дает возможность поставить стрелки часов в B так, что они будут показывать то же самое время, как и часы в A.

При втором способе мы вообразим, что в B находится зеркало, плоскость которого перпендикулярна к прямой AB. В точке A испу-

скают световой сигнал по направлению к B, и отмечают время t_1, выхода и время t_2 возвращения сигнала; на часах B отмечают время появления сигнала в B. На основании второго постулата, это время должно быть как раз среднее между t_1 и t_2, что и послужит для регулировки часов в B соответственно часам в A.

Про часы A и B, регулированные одним из этих двух способов, говорят, что они синхронны. Легко убедиться, что если пара часов в A и B синхронны, и пара часов в A и C также синхронны, то и пара часов в B и C оказываются синхронными. Итак, одним из двух способов, можно все часы, расположенные в системе S сделать синхронными и мы будем говорить, что все часы в S показывают одно и то же время в любой момент времени. Но, как будет видно из дальнейшего, самый термин «момент времени» имеет смысл только для одной, данной системы.

Для избежания недоразумений, мы должны точно указать, что̀ мы будем понимать под временем какого-либо события, происходящего в данной системе. Мы должны подчеркнуть, что это время не следует смешивать со временем наблюдения явления, т. е., с тем временем, которое показывают часы наблюдателя в тот момент, когда он это явление замечает. Это время имеет, очевидно, вполне случайный характер, ибо оно зависит от расстояния между наблюдателем и тем местом, где произошло событие. Время наблюдения настолько позже времени события, сколько времени нужно, чтобы луч света распространился от места, где произошло событие, к месту, где находится наблюдатель. Случайный характер времени наблюдения наглядно выступает из рассмотрения такого случая.



Черт. 3.

Положим, что точки A, B, C, P и Q (черт. 3) расположены в одной и той же системе, причем расстояния CP и CQ равны между собой; в точках A, B и C находятся наблюдатели, в P и Q происходят одновременно два события, напр., испускаются световые сигналы. Ясно, что C наблюдает оба явления одновременно; A замечает явление

P раньше, чем явление Q, а наблюдатель B, наоборот, замечает явление Q раньше, чем явление P.

Освобождаясь от такой случайности, мы, говоря о времени события, происходящего в данной системе, всегда будем предполагать, что наблюдатель, где бы он ни находился, правильно определяет это время, вычитая из времени, которое показывают его часы в момент наблюдения, то время, которое потребовалось лучу, чтобы пройти от места события до места наблюдения. Выражаясь иначе, мы можем сказать: под временем какого-либо события мы, для данной системы S, подразумеваем то время, которое показывали бы любые из изохронных часов этой системы, если бы часы находились в том месте, где явление происходит. Оба определения, очевидно, тождественны. Основываясь на них, мы можем сказать, что понятия об одновременности двух событий, или о том, что первое произошло раньше или позже второго, имеют вполне определенные значения, совершенно одинаковые для всех наблюдателей, находящихся в различных местах системы S; приэтом предполагается, что оба события происходят в системе S.

Предположим теперь, что мы имеем две системы S и S' (черт. 2, стр. 17), относительное движение которых прямолинейное и равномерное со скоростью v; для наблюдателей в S, система S' движется слева направо, как указано стрелкой. Как в S, так и в S' имеются наблюдатели и множество часов, которые, одним из двух вышеописанных способов, сделаны изохронными, причем второй постулат Эйнштейна считался приложимым и к системе S'. Понятия об одновременности, о «позже» и «раньше» имеют в системе S' столь же определенный смысл, как и в системе S'.

Если, однако, сравнить наблюдения, производимые в двух системах, то оказывается, как уже было отмечено на стр. 30—31, что каждая из двух систем имеет свое особое, присущее ей течение времени. Это значит:

1. Событие, совершающееся в одной системе (световой сигнал в S), происходит одновременно для всех точек (наблюдателей) этой системы: оно происходит разновременно для точек другой системы (S'). Слова «момент времени» имеют смысл всегда только для одной системы, ибо, в один и тот же момент времени системы S, различные точки системы S' имеют неодинаковое время.

2. Два события, которые для наблюдателей, находящихся в одной системе, происходят одновременно, происходят для наблюдателей, находящихся в другой системе, неодновременно

3 Время, протекающее от одного события до другого, неодинаково для двух систем; то же самое относится к продолжительности

какого-либо явления, т.-е. ко времени, протекающему от начала до конца этого явления. Это время наименьшее в той системе, в одной из точек которой событие происходит.

4. Последовательность двух явлений может быть неодинаковою в двух системах. Это значит, что для одной системы первое событие может произойти раньше второго, а для другой системы — первое позже второго

Мы можем иллюстрировать сказанное несколькими примерами.

1. Когда система S' (черт. 2, стр. 17) находится еще далеко налево от S, наблюдатели A (в S) посылают наблюдателям A' (в S') беспроволочную телеграмму такого содержания: «просим повернуть часы, которые у вас расставлены вдоль вашей системы S', так, чтобы мы их могли видеть; мы намерены одновременно отметить время, которое они показывают, чтобы посмотреть, действительно ли они изохронны». Вдоль системы S стоят многочисленные наблюдатели и в тот момент, когда S', пролетая мимо S, находится в положении, изображенном на черт. 2, отмечают показания часов, находящихся в S'. Они находят, что эти часы указывают неодинаковое время, и притом так, что каждые часы отстают от своих соседей, находящихся от них налево (если смотреть со стороны системы S). Наименьшее время показывают часы на переднем конце N системы S', наибольшее — часы на заднем конце M. Наблюдатели A' в S' машут руками и кричат: «что вы делаете? ведь вы производили ваши отметки неодновременно!» Но это неверно: наблюдатели в A произвели свои отметки вполне одновременно. Допустим теперь, что наблюдатели A', получив телеграмму, ответили такою же просьбой и также одновременно отмечают время, показываемое часами, расставленными вдоль системы S, которая для них также движется слева направо, а на черт. 2 справа налево. Оказывается, что часы в S показывают неодинаковое время и притом опять наименьшее время передние часы в P, а наибольшее — задние часы в Q. Каждая из двух групп наблюдателей утверждает, что часы другой группы не регулированы, не изохронны. Обе группы неправы, ибо в каждой из двух систем все часы изохронны.

II. Положим, что две системы S и S' находятся при встрече, изображенной на черт. 2, так близко друг к другу (часть CD отсутствует), что точки K и L, находящиеся как раз в середине двух систем, располагаются рядом, на очень малом друг от друга расстоянии. Наблюдатели в K и в L производят, каждый, по световому сигналу, в тот момент, когда они находятся рядом. Все наблюдатели A в S и все наблюдатели A' в S' определяют, по своим часам времена этих двух событий, отмечая времена наблюдений и вводя те

поправки, о которых раньше было сказано. Все наблюдатели знают, что точки K и L находились рядом, когда были пущены сигналы, а потому наблюдатели A в S принимают, что точка K находилась от них на таком же расстоянии, как точка L их системы S. Оказывается следующее. Для всех наблюдателей A (в S) световой сигнал в L произошел, понятно, в одно и то же время; точно также все наблюдатели A' (в S') находят одно и то же время для сигнала, произведенного в K. Но различные наблюдатели A находят различные времена для сигнала в K; аналогично, различные наблюдатели A' находят для сигнала в L неодинаковые времена. Этим иллюстрируется тот факт, что в определенный момент времени одной системы, точки другой системы имеют различные времена.

III. Когда системы S и S' находятся в том положении, которое изображено на черт. 2, наблюдатель в M смотрит на часы, установленные в P, и замечает, что эти часы и часы, стоящие рядом с ним в M, случайно указывают одинаковое время. Он знает, что все часы в S изохронны, а потому ожидает, что, при движении вдоль системы S, он на всех часах этой системы увидит то время, которое показывают его часы в M. Но это неверно; часы в S и его часы будут все более и более расходиться, по мере того, как он будет приближаться к концу Q системы S.

Ограничиваемся этими тремя иллюстрациями того, что абсолютного времени не существует, и что каждая из систем, относительное движение которых прямолинейное и равномерное, имеет свое время, так что элементарные понятия об одновременности, о «раньше» и «позже» делаются понятиями относительными.

На только что изложенное можно возразить, что все эти странные результаты получились вследствие того, что наблюдатели, находящиеся в одной системе, желая сделать свои часы изохронными, пользовались вторым постулатом Эйнштейна, т.-е. предполагали, что скорость света, измеряемая в их системе, одна и та же по направлению движения системы и против этого движения. Этот постулат, повидимому, противоречит логике и здравому смыслу, и потому неудивительно, что он привел к столь странным следствиям. Однако, такое возражение было бы неправильно. Действительно, если бы учение Эйнштейна о времени было неверно, если бы существовало только одно, единственное, мировое, абсолютное время, то скорость света, измеренная в различных направлениях внутри движущейся системы, непременно должна была бы получиться неодинаковой. Но тогда опыты Майкельсона и других ученых остались бы необъясненными, ибо эти опыты показывают, что измеренная скорость света во всех направлениях фактически одинако-

вая. Кроме того, отрицание нового учения о времени неразрывно связано с мыслью о возможности измерения скорости абсолютного движения системы, а эта мысль недопустима на основании всего, что выше было изложено об абсолютном движении и что нашло свое выражение в первом постулате Эйнштейна. Другого исхода нет: чтобы объяснить опыты Майкельсона и др., мы должны свергнуть время с пьедестала абсолютности. Обратно, можно сказать: принимая новое учение о времени, мы, путем математических вычислений, которым здесь не место, можем, строго логично, объяснить опыты Майкельсона и др. Поколебленная этими опытами логика восстанавливается, и «здравый смысл» торжествует при том построении, которое и составляет основу специального принципа относительности Эйнштейна.

§ 8. Размеры и форма тел. В тесной связи с только что изложенным находится второй из основных выводов специальной теории относительности, касающийся размеров и формы тел. Мы видели, что новое учение привело к отрицанию абсолютности времени со всеми вытекающими отсюда парадоксальными последствиями. Но не менее, а, пожалуй, даже еще более парадоксальными представляются те мысли и факты, к которым мы теперь обращаемся.

Размеры и форма тел представляются нам, как нечто присущее данным телам, как нечто абсолютное, безотносительное к чему бы то ни было. Длина стержня, ребро куба, диаметр шара присущи этим телам, как и их форма; куб всегда остается кубом, шар — шаром, где и каким образом мы бы ни определяли их форму. Все это оказывается совершенно неверным.

Одно и то же тело имеет в различных системах, напр, в S и в S', неодинаковые размеры и неодинаковую форму. Это надо так понимать. Положим, что какое-либо тело покоится в системе S', где наблюдатели A' измеряют его размеры и определяют его форму. Наблюдатели A в S видят тело M движущимся вместе с S', и мы можем, забывая о системе S', просто сказать, что M есть тело, движущееся в системе S. Особым способом, о котором сейчас будет сказано, наблюдатели A в S определяют размеры и форму тела M; они находят для размеров, имеющих направление движения тела M, меньшую величину, чем нашли наблюдатели в S' и чем они сами нашли бы, если бы тело M покоилось в их системе S. Для размеров, перпендикулярных к направлению движения, они получают то же самое, что нашли наблюдатели A', и что они сами опять-таки получили бы, если бы

тело M покоилось в их системе S. Соответственно, и форма тела M оказывается для наблюдателей A в S иной, чем для наблюдателей A' в S', а именно — сплюснутой по направлению, в котором тело M движется в системе S. Форму покоящегося в S' тела Эйнштейн называет его геометрической формой, в отличие от кинематической (кинематика есть учение о движении), которую имеет это же тело в системе, в которой оно движется. Может быть, было бы более правильно и ясно первую форму назвать статической, а вторую динамической, но мы сохраним терминологию Эйнштейна.

Покажем теперь, каким образом наблюдатели A в S определяют кинематическую длину стержня, расположенного в S' так, что направление этой длины совпадает с направлением движения системы S', а след. и самого стержня. Для этого они, пользуясь беспроволочным телеграфом (стр. 34), заранее просят наблюдателей A' в S' установить стержень $C\ D$ так, как показано на черт. 2. Сами они устанавливают длинную палку по направлению $P\,Q$. Два наблюдателя A в S отмечают на этой палке, вполне одновременно, те две точки, против которых находятся концы C и D стержня, и затем измеряют расстояние между этими двумя точками, которое, казалось бы, должно равняться длине стержня, каковая длина им известна, так как у них имеется совершенно такой же стержень (напр., метр). Однако, измерив расстояние двух точек на палке, наблюдатели A находят, что оно меньше длины стержня, находящегося у них в системе S. Наблюдатели A' в S', которые следили за действиями двух наблюдателей A, машут руками и кричат, что отметки на палке были сделаны неодновременно, что конец C был отмечен несколько позже, чем конец D, так что первый успел передвинуться направо (если смотреть со стороны S), и что поэтому получилась меньшая длина, чем следует. Оба правы: наблюдатели A делали отметки одновременно, т.-е. в один и тот же момент времени системы S, но в разные моменты времени системы S'. Если бы стержень CD был расположен перпендикулярно к направлению относительного движения двух систем, напр., перпендикулярно к плоскости чертежа 2-го, то два наблюдателя A в S нашли бы для стержня ту же длину, которую они получают для такого же, имеющегося у них стержня, или которую находят наблюдатели A' в S' для стержня CD. Заметим еще, что кинематическая длина стержня CD, измеренная только что описанным способом наблюдателями A в S, оказывается тем меньше, чем больше относительная скорость двух систем S и S'. Если бы наблюдатели A в S расположили имеющийся у них стержень так, как на черт. 2 расположен стержень $C\ D$, и наблюдатели A' в S' измерили бы его длину вышеописанным способом, то они нашли бы,

что он короче стержня CD, измеренного ими же в состоянии покоя в системе S'.

Представим себе теперь, что в системе S' покоится тело, напр., куб, из какого-либо материала; он расположен так, что четыре параллельных друг другу ребра имеют направление относительного движения систем S и S'. Наблюдатели A' в S' видят перед собою неподвижное тело; они совершенно спокойно измеряют его размеры, т.-е. определяют все расстояния восьми вершин тела друг от друга, а также углы между ребрами, и таким образом убеждаются, что перед ними находится куб. Эту форму тела, воспринимаемую наблюдателями A', относительно которых тело покоится, Эйнштейн и называет его геометрической формой. Скорость движения системы S' (относительно системы S) приэтом никакой роли не играет. Существенным является только то, что тело и наблюдатели, принадлежа к одной и той же системе, не обладают относительным движением. Теперь допустим, что в системе S находятся восемь наблюдателей A; у них, как мы видели, одно и то же время и их часы идут совершенно одинаково. Они видят тело, имеющее восемь вершин и движущееся прямолинейно и равномерно. Желая определить его форму, они поступают следующим образом. В условленный момент, т.-е. вполне одновременно (для системы S), они отмечают в своей системе восемь точек, через которые одновременно проходят вершины движущегося тела. Затем, когда тело удалилось, они спокойно измеряют расстояния и взаимное расположение восьми отмеченных ими точек. Так как вершины тела находились одновременно (для системы S) в отмеченных восьми точках, и так как наблюдатели A' в S' убедились, что тело имеет форму куба, то следовало бы ожидать, что и в системе S восемь отмеченных точек окажутся на равных друг от друга расстояниях и что они расположены так, как расположены вершины куба. В действительности оказывается совсем другое. Передняя и задняя (считая по направлению движения) оказываются такими же квадратами, как и для наблюдателей A' в S'. Но остальные четыре боковые стороны оказываются не квадратами, но прямоугольниками, четыре стороны которых (четыре ребра), параллельные движению, меньше восьми сторон, перпендикулярных к этому движению, т.-е. восьми сторон переднего и заднего квадратов. Тело уже не имеет форму куба; оно оказывается как бы укороченным, или сжатым по направлению относительного движения систем S и S'. Такое же сжатие по направлению движения получается в системе S для всех тел системы S'. Тело, которое имеет в системе S' форму шара, оказывается в системе S обладающим формой, которую принимает шар, если его сдавить, сплюс-

нуть с двух противоположных сторон. Форму тела, определенную указанным способом наблюдателями A в системе S, Эйнштейн называет кинематическою формой тела. Теперь ясно, чем она отличается от геометрической формы того же тела, определенной наблюдателями A' в системе S'. Само собою разумеется, что если тело, напр., тот же куб, покоится в системе S, то наблюдатели A найдут его геометрическую форму, т.-е. именно куб, а наблюдатели A' в S'— его кинематическую, выше описанную, форму.

Чем больше относительная скорость двух систем, тем более отличается кинематическая форма тела от геометрической, тем более первая представится сплюснутой, сравнительно со второй.

Из всего сказанного явствует, что размеры и форма тел вовсе не имеют характера чего-то абсолютного; в различных системах тела обладают неодинаковыми размерами и неодинаковой формой, которые зависят от той скорости, с которой тела движутся относительно данной системы.

Легко понять, что все сказанное здесь о размерах и о форме тел находится в теснейшей связи с тем, что в предыдущем параграфе было изложено по отношению к вопросу о времени. Действительно, мы сказали, что наблюдатели A системы S отмечают одновременно, т.-е. в один и тот же момент времени системы S, положения восьми вершин куба. Но для наблюдателей A' системы S' это отмечание происходит не одновременно, т.-е. в разные моменты времени системы S'. Глядя на свои часы, сверенные между собою и показывающие время системы S', они замечают, что четыре наблюдателя A, отмечающие положения четырех передних вершин куба, действительно делают свои отметки одновременно, и что то же самое относится к четырем другим наблюдателям A, отмечающим задние вершины. Но эти последние наблюдатели делают свои отметки позже (по времени системы S') первых четырех; этим для наблюдателей A' и объясняется полученное в S сокращение размеров тела.

Оказывается, что уменьшение размеров кинематической формы тела сравнительно с размерами геометрической формы, по величине и по направлению (по направлению движения) вполне тождественно с тем, которое предполагает гипотеза Лоренца и Фицжеральда (§ 6). Но по существу дела разница огромная.

Действительно, по гипотезе Лоренца и Фицжеральда, уменьшение размеров тела зависит от его абсолютной скорости в неподвижном эфире. Покоящийся в эфире куб фактически сплющивается, когда он приходит в движение. В учении Эйнштейна также говорится о покоящемся кубе, который при движении сплющивается, но здесь и речи

нет о фактическом, реальном уменьшении размеров тела, и все дело сводится к изменению формы, воспринятой наблюдателем. Покой и движение имеют здесь только относительный характер. Размеры тела не меняются для наблюдателя, находящегося на одной с этим телом системе, как бы ни менялась скорость движения этой системы. Но наблюдатели на других системах воспринимают другую форму и притом всегда сплюснутую по направлению их движения относительно первой системы. Если куб покоится в системе S и две другие системы S' и S'' движутся относительно S по направлениям взаимно перпендикулярным, то для наблюдателей A' в S' тело представится сплюснутым в одном направлении, а для наблюдателей A'' в S'' — сплюснутым по направлению, перпендикулярному к первому.

Все, что было изложено в этом и в предыдущем параграфах, должно быть дополнено весьма важным указанием на количественную сторону тех расхождений часов и тех изменений размеров тел, которые были рассмотрены только с качественной стороны. Всякий, познакомившись с вышеизложенным, спросит: как велики расхождения часов и изменения размеров тел? Почему мы их не замечаем в повседневной жизни, и можно ли их вообще измерить? Оказывается следующее. Расхождение часов и изменение размеров тел будут тем больше, чем больше относительная скорость двух систем, которую мы обозначим буквой v; но они делаются заметными только в том случае, когда скорость v не очень мала сравнительно со скоростью света, равной 300000 километров в одну секунду. Однако, все скорости тел, которые мы наблюдаем, ничтожно малы сравнительно со скоростью света. Даже скорость Земли при ее движении вокруг Солнца (30 километров в секунду) в десять тысяч раз меньше скорости света. Вычисление показывает, что при такой относительной скорости кажущееся уменьшение диаметра Земли (13000 километров) составит всего только $6^1/_2$ сантиметров! Для того, чтобы уменьшение длины стержня (стр. 37) составляло одну милионную долю всей длины, необходимо, чтобы v равнялось 40 километрам в секунду. Сокращение составит одну сотую, когда v равняется 14000 килом. в сек, оно дойдет до одной десятой (т. е. длина стержня в S составит 0,9 длины в S'), когда относительная скорость равна 130000 килом. в сек. Длина стержня уменьшится наполовину, когда v равно 258000 килом. в сек. т. е. 0,86 скорости света; при скорости в 298500 килом. в сек. (0,995 скорости света) длина уменьшится до одной десятой длины покоющегося стержня.

Теория показывает, что если бы относительная скорость достигла скорости света, то длина стержня, опре-

деляемая наблюдателями в системе S, оказалась бы равной нулю. Это показывает, что скорость света играет роль предельной относительной скорости двух систем. Никогда и ни при каких условиях относительная скорость не может достигнуть этого предела, и тем более, не может его превзойти. Однако весьма важно отметить, что под относительной скоростью двух систем S и S' всегда подразумевается скорость системы S, измеренная наблюдателями A' в S', или скорость системы S', измеренная наблюдателями A в S. И те и другие наблюдатели пользуются своими часами и своими мерами длины; и те и другие находят для относительной скорости одну и ту же численную величину, но понятно, противоположные направления *).

§ 9. Некоторые следствия, вытекающие из постулатов специального принципа относительности. Сложение относительных скоростей. Мы видели, что два постулата Эйнтейна, с первого взгляда, представляют как будто весьма небольшое расширение старого принципа относительности механики Ньютона. То, что для систем, движущихся прямолинейно и равномерно, давно признавалось верным по отношению ко всем физическим явлениям, за исключением тех, которые считались происходящими в покоящемся эфире, т.-е. световых, признается верным и для этих последних. Но мы уже видели, что это расширение, явно противореча тому, что казалось логически безусловно необходимым следствием самых элементарных представлений, в действительности вносит коренной переворот в эти основные представления и понятия. Оно заставляет нас произвести полную переоценку почти всех основ нашего миропонимания. Мы можем здесь упомянуть лишь о весьма немногих из тех последствий, к которым приводит специальный принцип относительности, так как огромное их большинство совершенно выходит из рамок того, что может быть изложено элементарно.

Прежде всего, понятно, отпадает необходимость искать объяснения отрицательных результатов тех опытов (напр., Майкельсона), о которых было сказано выше. Первый постулат говорит, что эти опыты должны дать отрицательный результат, а из него вытекает новое учение о времени и о размерах тел. Само собою разумеется, что, приняв это учение, мы из него можем, обратно, показать, что опыты Майкельсона и других не могли дать никакого результата.

*) Примечание 5.

На стр. 22 мы привели воззрения различных ученых на эфир и, между ними, мнение Эйнштейна, что эфир не существует. Приэтом под эфиром подразумевалось неподвижное вещество, наполняющее междузвездное пространство, причем каждая «частица» эфира сама по себе реально существует и находится в определенном месте, аналогично частицам воздуха в атмосфере, или частицам воды в океане. Если существует такой эфир, то покой и движение относительно него и представятся нам, как абсолютный покой и как абсолютное движение. Принцип относительности утверждает, что все системы, относительные движения которых прямолинейны и равномерны, как бы равноценны; все без исключения физические явления происходят в них совершенно одинаково, и ни одна из них не имеет какого-либо преимущества перед другими. Но если эфир существует, то система, покоящаяся в нем, явно отличалась бы от всех других и это должно было бы так или иначе отпечатлеться на происходящих в ней физических явлениях.

Мы теперь можем буквально повторить то, что уже было сказано в § 5: Безусловно отрицая существование абсолютного покоя и абсолютного движения, хотя бы пока только прямолинейного и равномерного, мы должны отказаться от мысли о существовании эфира, как вещества, отдельные малые части которого самостоятельно существуют.

Заметим мимоходом, что отрицание эфира не имеет никакого влияния на современное учение о свете, так как наука вполне отказалась от мысли рассматривать свет, как распространяющееся в пространстве упругое колебательное движение частиц эфира, когда Максвелл создал электромагнитную теорию света и когда Герц (1884) открыл электромагнитные лучи, которыми пользуются в беспроволочной телеграфии.

В самое последнее время, Эйнштейн (1921) повидимому возвращается к мысли о существовании эфира. Но он приписывает этому эфиру весьма странные свойства, вернее говоря, отсутствие всяких свойств. О покое или движении тела относительно этого эфира не может быть и речи. Нам нет надобности останавливаться на этих новых мыслях Эйнштейна, повидимому еще не вылившихся в сколько-нибудь ясную и окончательную форму.

Обратимся теперь к одному из выводов специальной теории относительности, с первого взгляда особенно поражающему своею парадоксальностью, которая, однако, как мы увидим, исчезает, если вникнуть в существо дела. Мы имеем в виду сложение относи-

тельных скоростей. Положим, что мы имеем три системы S, S' и S'' с наблюдателями A, A' и A'', напр., берег реки, пароход и коляску, движущуюся по его палубе. Пусть v' есть скорость системы S'' относительно S (парохода относительно берега) и v'' скорость S'' относительно S' (коляски относительно парохода), и положим, что v'' и v' имеют одинаковое направление (коляска движется по направлению движения парохода). Спрашивается: какова скорость v системы S'' относительно системы S (коляски относительно берега)? Это вопрос из элементарного задачника арифметики, и, понятно, всякий скажет, что $v = v' + v''$, т.-е. что скорость системы S'' относительно системы S равна скорости S' относительно S, сложенной со скоростью S'' относительно S'. Так, напр., скорость коляски относительно берега получится, если сложить скорость парохода относительно берега со скоростью коляски относительно парохода. И вот, теория относительности приводит к результату, что это простое правило, которое, повидимому, диктуется элементарнейшей логикой и «здравым смыслом», совершенно неверно! Оказывается, что v не равно сумме $v' + v''$, но всегда меньше этой суммы. Величина v выражается гораздо более сложной формулой *). Если бы скорость v'' имела направление обратное скорости v', то мы ожидали бы, что $v = v' - v''$ (коляска движется по направлению, обратному движению парохода). Оказывается, что v больше этой ожидаемой разности $v' - v''$.

Поразительнее всего, что относительная скорость v никогда не делается равною скорости света c, как бы велики ни были скорости v' и v'', если только каждая из них не больше c. Положим, напр., что $v' = 0{,}9\ c$ и $v'' = 0{,}9\ c$, так что следовало бы ожидать $v = 1{,}8\ c$. Но оказывается, что $v = 0{,}9945\ c$. Если одна из слагаемых скоростей, напр. $v' = c$, то при всяком v'' (не больше c) получается $v = c$; это значит, что какую бы скорость ни сложить со скоростью c, мы при сложении получим ту же предельную скорость c. И даже если $v' = c$ и $v'' = c$, все-таки получается $v = c$, вместо ожидаемого $v = 2\ c$.

Последний результат можно обобщить. Представим себе произвольное число, напр., 50 систем, из которых каждая следующая движется относительно предыдущей со скоростью, равной скорости света c, причем все эти скорости имеют одно и то же направление. Следовало бы ожидать, что, напр., 28-ая система движется относительно первой со скоростью $27\ c$, а последняя — со скоростью $49\ c$. Прин-

*) Примечание 6.

ции относительности приводит к результату, что все системы, до пятидесятой включительно, движутся относительно первой со скоростью c, и что вообще относительная скорость каких-либо двух из этих систем, напр., 18-ой и 42-ой, также равняется c. Наблюдателю на первой системе представляется, что все остальные 49 систем движутся с одинаковой скоростью c, т.-е. нераздельно друг от друга. Наблюдателю, находящемуся на произвольной из этих систем, напр., на 21-ой, кажется, что все системы, от 1-ой до 20-ой, удаляются от него в одну сторону, с общею скоростью c, а все остальные, т. е. от 22-ой до 50-ой, движутся с тою же скоростью c противоположную сторону.

Против только что изложенного можно возразить, что относительная скорость c представляет нечто предельное, реально неосуществимое. Это совершенно верно, но дело весьма мало меняется, если предположить, что скорость каждой из пятидесяти систем относительно предыдущей равняется, напр., 0,99 c. В этом случае все-таки все относительные скорости, напр., пятидесятой относительно первой или 41-ой относительно 8-ой, оказываются не достигающими скорости c.

Все эти результаты представляются в высшей степени парадоксальными, или даже просто нелепыми. Но такой взгляд основан на недоразумении, которое необходимо выяснить. Несомненно, что читатель невольно представляет себе все 50 систем как бы находящимися перед ними; ему кажется, что он видит, с какой скоростью каждая система движется относительно предыдущей, напр., для случая трех систем (см. выше), вторая относительно первой со скоростью 0,9 c и третья относительно второй также со скоростью 0,9 c. Ему и представляется абсурдом, что третья система движется относительно первой со скоростью не 1,8 c, но всего только 0,9945 c. Однако, вся эта картина, в которой читатель играет роль лица, созерцающего относительные скорости различных систем, в корне неверна. Дело в том, что под относительной скоростью двух систем, как уже было сказано (конец § 8), следует понимать ту скорость, которую измеряют наблюдатели, находящиеся как на одной, так и на другой из этих двух систем, и пользующиеся своими часами и своими мерами длины. Наблюдатели, находящиеся на одной системе, не могут измерить относительную скорость, с которой движутся, друг относительно друга, две другие системы. Так, напр., в только что упомянутом случае трех систем, наблюдатель в S измеряет скорости второй (0,9 c) и третьей (0,9945 c) относительно первой, в которой он находится; но скорость второй и третьей друг относительно друга не-

доступна его измерению. Легко сообразить, что во вполне аналогичном положении находится наблюдатель в системе третьей (S''). Наблюдатель во второй системе находит, что первая и третья движутся относительно него с одинаковыми скоростями 0,9 c, и притом в противоположных направлениях; об относительной скорости первой и третьей систем он ничего сказать не может. Легко обобщить сказанное и к произвольному числу систем.

Теперь ясно, где кроется то недоразумение, которое приводит к мысли о парадоксальности или даже нелепости правила сложения скоростей. Читатель не должен как бы видеть перед собою все системы и замечать, что относительная скорость двух соседних систем равна 0,9 с. Ведь читатель должен же где-нибудь находиться, т.-е. либо на одной из этих систем, либо он сам представляет особую систему S_0. Он может знать только о скоростях различных систем относительно его системы S_0. Но относительную скорость двух других систем, напр. 11-ой и 12-ой, он определить не может, и если мы говорим, что она равна 0,9 c, то это значит, что наблюдатели систем 21-ой и 22-ой, *пользуясь своим счетом времени и длин*, находят ее равной 0,9 c; но для читателя, находящегося на другой системе, она весьма мала вследствие того, что у него совсем другой счет времени и длин.

Из сказанного явствует, что *мы имеем только один фундаментальный факт, а именно — относительность времени*. Из него уже вытекают кажущийся парадокс об относительности размеров и формы тел, и парадокс о сложении относительных скоростей *).

§ 10. Масса, энергия и температура. Из большого числа дальнейших следствий, вытекающих из специального принципа относительности, мы можем здесь указать лишь на весьма немногие.

Нам впоследствии (§ 15) придется подробнее остановиться на рассмотрении величины, которая называется *массою* тела, но сейчас нам нет надобности углубляться в этот вопрос и мы можем ограничиться тем обычным, элементарным представлением об этой величине, которое может быть изложено следующим образом. Если тело движется прямолинейно и на него действует *сила*, имеющая направление этого движения, то скорость движения будет возрастать; сила как бы подгоняет тело, заставляя его двигаться все быстрее и быстрее. Если

*) Примечание 7.

сила остается постоянною, т.-е. не меняется со временем по величине, то скорость будет возрастать равномерно. Мы имеем так называемое равноускоренное движение, при котором скорость в течение равных промежутков времени, напр., через каждую секунду, одинаково возрастает. Увеличение скорости в единицу времени, напр., в одну секунду, называется ускорением рассматриваемого движения. Чтобы заставить различные тела двигаться с одинаковым ускорением, мы должны, вообще говоря, действовать на них неодинаковыми силами, и это приводит нас к понятию о массе тела. Если мы желаем, чтобы два тела двигались с одинаковым ускорением, и оказывается, что для этого необходимо приложить к первому телу силу, которая в три раза больше силы, которая должна действовать на второе тело, то мы говорим, что масса первого тела в три раза больше массы второго. Обобщая, можно сказать, что массы различных тел пропорциональны тем силам, которые должны действовать на эти тела, чтобы они все двигались с одинаковым ускорением. Если одинаковые силы действуют на различные тела, то эти тела движутся с ускорениями, которые обратно пропорциональны их массам. Если, напр., масса одного тела в пять раз больше массы другого, и на них действуют две одинаковые силы, то ускорение первого будет в пять раз меньше ускорения второго. Далее оказывается, что массы двух тел относятся между собой, как веса этих тел, определенные, конечно, в одном и том же месте, так как все зависит от географической широты места и от его высоты над уровнем океана; при переходе от экватора к полюсам Земли, вес тел увеличивается вследствие того, что Земля сплюснута, а при подъеме вверх вес уменьшается вследствие удаления от центра Земли. Если из двух тел одно весит в десять раз больше другого, то масса первого в десять раз больше массы второго. То, что выше было сказано о действии постоянных сил, относится также к действию мгновенных сил, т.-е. ударов. Положим, что на совершенно гладкой горизонтальной плоскости лежат два шара, и что вес первого в шесть раз больше веса второго, так что и масса первого в шесть раз больше массы второго. Подвергнем оба шара совершенно одинаковому боковому удару; тогда первый шар начнет двигаться со скоростью, которая в шесть раз меньше скорости движения второго шара.

Вес тела зависит от того места, где оно находится, но масса тела считалась в механике Ньютона за нечто, присущее этому телу, безусловно постоянное и не меняющееся ни при каких условиях, если конечно, сохраняется целость тела. Принцип относительности приводит к поразительному и важному результату, что масса тела не есть

определенная, абсолютная величина, но что она обладает столь же относительным характером, как время, или размеры и форма тел. Положим, что некоторое тело покоится в системе S' (рис. 2,стр. 17) и пусть m_0 масса этого тела, которую получают наблюдатели A' в S', определяя ту силу f', которая должна действовать на тело в течение одной секунды, чтобы оно приобрело некоторую небольшую скорость v_0. Для наблюдателей A в системе S это тело движется со скоростью v (так мы обозначили относительную скорость двух систем S и S'). Они желают увеличить скорость тела на величину v_0 в течение одной секунды, т.-е. сделать ее равною $v+v_0$. Оказывается, что они для этого должны действовать на тело с некоторою силою, которую мы обозначим через f. Полагая, что масса тела есть величина неизменная, присущая телу, мы должны ожидать, что для увеличения скорости тела, в одну секунду, на величину v_0 всегда требуется одна и та же сила, безразлично, увеличивается ли скорость от нуля до v_0 (наблюдатели A'); или от произвольного v до $v+v_0$ (наблюдатели A); иначе говоря, силы f и f' должны быть равны между собою. Оказывается, однако, что сила f больше силы f'; отсюда следует, что рассматриваемое тело обладает в системе S массою m, которая больше массы m_0 того же тела в системе S', в которой это тело покоится. Мы можем несколько иначе взглянуть на дело, устранив совершенно систему S' и полагая, что тело движется в системе S, в которой оно также обладало бы массой m_0, если бы оно в ней покоилось. Тогда мы можем сказать, что масса движущегося тела больше массы тела покоящегося. Чем больше скорость движения тела, тем больше его масса, что совершенно меняет одно из основных положений механики Ньютона. Более подробный математический разбор вопроса приводит к результату, что если бы скорость тела сделалась равной скорости света ($v=c$), то масса тела стала бы бесконечно большою. Это означает, что если бы скорость тела стала равною скорости света, то уже никакими силами нельзя было бы изменить эту скорость. Здесь вновь скорость оказывается предельною величиной, которую не только нельзя превзойти, но и достичь ее невозможно, так как потребовалось бы произвести бесконечно большую работу, чтобы заставить тело двигаться со скоростью света *).

Когда скорость v тела мала сравнительно со скоростью света c, то увеличение массы ($m-m_0$) незаметно мало, а это относится ко всем случаям движения обыкновенных тел, которые нам известны, не исклю-

*) Примечание 8

чая, как уже было сказано, небесных светил. Но в области электрических явлений мы встречаемся со скоростями, которые не только не малы сравнительно со скоростью света, но, в некоторых случаях, почти ей равны, доходя до 0,95 c. Такими скоростями обладают электроны, эти мельчайшие частицы, или, если угодно, атомы отрицательного электричества, выбрасываемые некоторыми радиоактивными веществами. Непосредственные опыты показали, что масса электрона действительно возрастает с его скоростью, и притом как раз по тому закону, который указывается теорией относительности *).

Из элементарной физики известно, что энергия движущегося тела, иногда называемая живой силой, равна $^1/_2 mv^2$, т. е. полупроизведению массы тела на квадрат его скорости. Принцип относительности приводит к заключению, что энергия движущегося тела может быть принята равной этой величине только в том случае, когда v весьма мало сравнительно со скоростью c света. Точное выражение, верное для всякой скорости v, имеет более сложный вид, который мы здесь не выписываем. Обозначим энергию движущегося тела буквою η. Весьма любопытно, что при $v=c$ мы получаем для энергии η бесконечно большую величину, т.-е. такую, которая по старому учению должна получиться только при бесконечно большой скорости. Здесь особенно ярко выступает предельный характер скорости света. Тело, движущееся со скоростью света, обладает бесконечно большим запасом энергии, т.-е. работоспособности. Отсюда с очевидностью следует, как уже было сказано, что необходимо затратить бесконечно большую работу, чтобы довести тело до скорости света c. Такая предельная скорость неосуществима.

Теперь мы можем выяснить еще один из самых поразительных выводов принципа относительности. Мы видели, что масса m_0 покоющегося тела увеличивается на некоторую величину $m—m_0$, когда это тело движется. Обозначим это увеличение буквою μ, т.-е. положим

$$\mu = m — m_0 \quad \ldots\ldots \quad (1).$$

Эта разность растет с увеличением скорости v тела. В то же время тело приобретает энергию, которую мы обозначим буквой η. Принцип относительности приводит к поразительной связи между приобретенной массой μ и приобретенной энергией η, а именно: увеличение μ массы равняется возникшей энергии движения η,

*) Конец этого параграфа может быть опущен читателем без ущерба для понимания дальнейшего.

деленной на квадрат скорости света, т.-е. на $c^2 = c \times c$ (число c, помноженное само на себя). В виде формулы мы пишем

$$\mu = \frac{\eta}{c^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Теперь формула (1) дает

$$m = m_0 + \mu = m_0 + \frac{\eta}{c^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Эта формула показывает, что увеличение μ массы (при переходе от покоя к движению) является следствием возникновения энергии η; иначе говоря, мы должны заключить, что сама кинетическая энергия η движения обладает некоторой массой μ, которая численно равна этой энергии, деленной на огромное число $c \times c$. Это одна из самых смелых мыслей, когда-либо возникавших, но мы идем еще гораздо дальше.

В о-первых, мы знаем, что все формы энергии могут переходить одна в другую. Нельзя допустить, что только одна энергия движения обладает массой, которая вдруг возникает, когда эта энергия образуется из других форм энергии, напр., из теплоты, и бесследно исчезает, когда энергия движения превращается в другие формы энергии, напр., при ударе — в энергию тепловую. Поэтому мы заключаем, что всякая форма энергии обладает массой, определяемой формулой (2). Так, напр., теплота и свет обладают массой!

Формула (2) показывает, что масса энергии весьма мала, так как c^2 весьма большое число, и мы не можем убедиться в ее существовании непосредственными измерениями. Но мы должны, напр., заключить, что масса тела зависит от его температуры; с повышением температуры повышается запас тепловой энергии тела, а след. и его масса.

Когда система тел выделяет теплоту, то масса этой системы уменьшается. Когда 2 грамма водорода соединяются с 16 граммами кислорода, то должны были бы образоваться 18 граммов воды. Но химическая реакция соединения сопровождается выделением большого количества теплоты, и по формуле (2) легко вычислить, что получатся не 18 граммов воды, но меньше на 3,2 миллионных долей миллиграмма. Закон постоянства масс при химических реакциях оказывается неточным!

Во-вторых, мы делаем еще один смелый шаг. Если всякая энергия μ обладает массой $\eta = \mu \cdot c^2$, то отсюда следует, что масса и энергия вообще эквивалентны друг другу, и что следовательно, всякая по-

коящаяся масса тождественна с колоссальным запасом энергии E, где

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

Эта энергия почти вся остается в теле при температуре абсолютного нуля (—273° *Ц.*), при которой, как надо полагать, все остальные формы энергии (напр., тепловая, химическая и др.) уже исчезли Вся ощутимая и измеримая энергия, которою тело еще может обладать при иных, произвольных, физических условиях и при наиболее быстрых осуществимых движениях, ничтожно мала сравнительно с энергией, которая остается в нем при —273° *Ц.*, и которую Планк называет скрытою энергией. Он полагает, что теплота, которая непрерывно выделяется при распаде атомов радиоактивных тел. и есть эта скрытая энергия, и что мы имеем здесь дело с фактическим превращением материи в теплоту. Планк вычисляет, что 224 грамма радия теряют в течение одного года 0,012 миллиграмма, которые превратились в теплоту *).

В связи с предыдущим находится еще один удивительный результат температура тела в системе S (рис. 2), относительно которой оно движется, ниже, чем в системе (S'), относительно которой оно находится в покое.

Покончив со специальным принципом относительности, мы считаем необходимым еще раз подчеркнуть, что все, что до сих пор было изложено, верно только для таких систем, относительное движение которых прямолинейное и равномерное. Этот принцип возник, как результат попыток объяснить опыты Майкельсона и других ученых. Он построен на двух тесно связанных между собою постулатах, из которых первый представляется расширением стараго принципа относительности механики Ньютона. Ядро нового принципа заключается в учении об относительности времени и связанной с нею относительности размеров, а след. и формы тел. Необходимо запомнить, что специальный принцип относительности Эйнштейна построен на твердом фундаменте незыблемо установленного опытного факта.

§ 11. Об инерции или косности тел. Общий принцип относительности Эйнштейна принял в 1915-ом году вид более или менее законченного учения. Оказывается, что в нем играют важнейшую роль некоторые мысли, которые были высказаны и отчасти доведены до вы-

*) Примечание 9.

сокой степени развития еще задолго до Эйнштейна. Но Эйнштейн гениально связал эти мысли в одно целое, весьма многое и существенное к ним прибавил, построил новое научное здание и предсказал новые физические явления, которые затем действительно и были обнаружены. Таких до-эйнштейновских мыслей три, и мы прежде всего приступим к их рассмотрению

Первая из них относится к вопросу об инерции или косности тел; этот вопрос излагается в самых элементарных учебниках физики Мы можем все для нас существенное выразить следующими тремя положениями.

I Если тело, вполне предоставленное самому себе, т.-е. не подверженное никаким влияниям, находится в состоянии покоя, то оно по инерции остается в покое; если такое тело находится в состоянии движения, то оно по инерции «сохраняет» это состояние, двигаясь прямолинейно и равномерно. Иначе говоря, скорость тела не может, без внешнего влияния, измениться ни по направлению, ни по величине.

II. Тело «сопротивляется» всякому изменению скорости по величине или по направлению. Чтобы заставить тело двигаться ускоренно или замедленно или по криволинейному пути, необходимы внешние причины, действующие на тело; такие причины называются силами. Эти силы должны преодолеть инерцию тела, его «стремление» либо оставаться в покое, либо двигаться прямолинейно и равномерно Но так как сила может преодолеть только силу, то ввели в науку понятие о силе инерции, которую тело «противопоставляет» внешней силе.

III. Если тело вращается, то вследствие инерции появляется центробежная сила; частицы тела стремятся удалиться от оси, вокруг которой тело вращается. Так, напр., вращающийся жидкий шар сплющивается по направлению оси вращения. Как всем известно, Земля сплюснута, и это служит признаком того, что она когда-то находилась в жидком состоянии. За первоначальную причину центробежной силы принимается «стремление» частиц тела двигаться по инерции прямолинейно, т.-е. при вращении удаляться от оси вращения. Но силы сцепления, действующие между частицами, как твердых, так и жидких тел, преодолевают инерцию и заставляют их двигаться по окружностям. Таков, по крайней мере, один из способов разъяснения источника центробежной силы.

Все три положения, которые мы здесь привели, не выдерживают никакой серьезной научной критики; они оказываются совершенно неприемлемыми. Это не наука, а какая-то мистика! Разберем подробнее все три положения.

Положение I. Прежде всего отметим, что оно относится к телу, «вполне предоставленному самому себе, т.-е. не подверженному никаким внешним влияниям». Но ведь такой случай на деле реализовать невозможно, хотя бы уже потому, что все тела, окружающие нас на земной поверхности, находятся под влиянием Солнца и движутся вместе с Землей вокруг этого светила. Однако, мы этому обстоятельству не будем придавать большого значения. Гораздо важнее другой вопрос, касающийся первого положения. В последнем говорится о покое и о прямолинейном, равномерном движении. О каком покое и о каком движении тела, не подверженного никаким влияниям, идет здесь речь? Очевидно, это покой и движение не на Земле, не в нашей солнечной системе и не в нашей звездной системе. Покой и прямолинейное, равномерное движение, о которых говорится в первом положении, могут быть только абсолютным покоем и абсолютным движением в каком-то абсолютном пространстве. Но ведь мы видели, что таковые никакого смысла не имеют. и что нам пришлось открещиваться от абсолютного пространства, в котором нельзя определить положения тела, нельзя отличить покоя от движения. Ясно, что в первом положении говорится о таких событиях, которые не только не существуют в реальной действительности, но которые даже вообразить себе невозможно.

Положение II. Здесь говорится о том, что тело что-то такое «сохраняет», что оно к чему то «стремится» и даже в некоторых случаях «сопротивляется». Что это за курьезный антропоморфизм? Что это за странное перенесение человеческих переживаний на мертвую природу? И что это за удивительные «силы инерции», которые вдруг появляются, как только внешние причины начинают как бы обижать тело, меняя величину или направление его скорости? Это не наука, а какая-то мистика!

Положение III. Разбор вопроса о вращении приведет нас к наиболее важным для дальнейшего результатам. При вращении тела появляются центробежные силы; жидкий шар сплющивается. И вот перед нами вырастает грандиозная мысль, что сплющивание жидкого шара есть признак его абсолютного, т.-е. безотносительного, вращения. Шар сплюснут—значит, он вращается, абсолютно вращается, безотносительно к чему-либо. В § 3 мы должны были отказаться от мысли об абсолютном движении, а теперь мы, повидимому, все-таки нашли один случай абсолютного движения! Рассмотрим этот случай более внимательно. Мы вновь должны представить себе то «абсолютное пространство», о котором мы говорили в § 3. В нем находится жидкий шар и больше ничего, нет никакой материи и нас также нет. Жидкий шар сплюснут и мы заключаем, что он вращается и это вращение представляется нам

чем-то абсолютным. Однако довольно сомнительно, чтобы возможно было представить себе вращение тела в «абсолютном» пространстве, в котором нет возможности определить положение точки, а потому нельзя отличить покоя от движения Читатель убедится в этом, если он съумеет мысленно исключить и самого себя, как наблюдателя, видящего шар. Не будем, впрочем, на этом особенно настаивать, и перейдем к другому, более существенному вопросу. Мы спрашиваем где же причина появления центробежной силы и сплющивания шара? Ответ может быть только один, а именно. так как кроме шара существует только еще абсолютное пространство и так как шар вращается только относительно этого абсолютного пространства, то мы должны заключить, что в последнем и находится причина возникновения центробежной силы и сплющивания шара, оно виновато и в том, что жидкий шар сплюснулся. Пресловутое абсолютное пространство, этот «жуткий призрак», как его назвал один немецкий писатель, в котором нельзя отличить покоя от движения, вдруг является перед нами могучим деятелем, вызывающим сплющивание жидкого шара.

На несуразность этой мысли обратил впервые внимание, около сорока лет тому назад, знаменитый физик-философ Эрнст Мах, который был профессором в Праге, а затем в Вене. Он относился безусловно отрицательно ко всякой мысли о каком бы то ни было абсолютном движении. Вращение шара, помещенного где-либо в междузвездном пространстве, рассматривается им, как вращение относительное, а именно, как вращение относительно звездного неба, относительно совокупности отдаленных мировых или, как мы их в дальнейшем будем называть, космических масс. И вот это-то относительное вращение и есть причина возникновения центробежной силы и сплющивания жидкого шара, они вызываются не «абсолютным», пространством но наличностью отдаленных космических масс. Если бы не существовали эти космические массы, если бы в пространстве ничего не находилось, кроме одного жидкого шара, то ни о каком бы вращении его не могло бы быть и речи, ни при каких условиях не могли бы в нем возникнуть центробежные силы и не мог бы он подвергнуться сплющиванию.

Мах идет еще дальше и высказывает следующую смелую мысль. Так как сплющивание вызывается исключительно только относительным движением, то при одинаковости этого относительного движения должно получиться и одинаковое сплющивание. Отсюда следует, что такое же сплющивание жидкого шара должно иметь место и в том случае, если звездное небо вращалось бы вокруг шара.

И Мах говорит, далее, что нет никакого смысла отличать эти два случая друг от друга. Так как сущность дела заключается в относительном движении шара и звездного неба, и так как это относительное движение в обоих случаях одно и то же, то оба случая тождественны. Эта тождественность легко может читателю показаться сомнительной, если он, по недоразумению, припишет себе роль наблюдателя, который может видеть как шар, так и звездное небо, и сам неподвижно где-то находится. Это, очевидно, недопустимо. Наблюдатель должен где-нибудь находиться: или он находится на самом шаре, или он связан со звездным небом, или он сам представляется обособленным где-то в пространстве. В первых двух условиях ему, очевидно, оба случая движения действительно покажутся тождественными. Это особенно ясно когда он находится на шаре· ведь люди долгое время полагали, что небесный свод вращается вокруг Земли Если наблюдатель (читатель) обособлен в пространстве, то он о своем собственном движении ничего знать не может и потому не оказывается в состоянии судить о движениях внешних тел.

Вопрос станет еще яснее, если мы обратимся к случаю, когда в пространстве находятся два шара, A и B, из которых первый, A, не сплюснут, а второй B, сплюснут. И здесь возможны два случая Во-первых, шар B вращается, шар A и звездное небо неподвижны, во-вторых, шар B неподвижен, звездное небо и шар A вращаются вместе, т.-е. так, что их относительное вращение равно нулю. Но и здесь можно сказать, что оба случая тождественны, ибо сущность дела заключается только в том, что между шаром B и звездным небом имеет место относительное вращение, а между шаром A и небесным сводом такового не существует.

Итак, по мнению Маха, центробежная сила и сплющивание жидкого шара вызываются вращением относительно отдаленных космических масс То же самое следует сказать о всех случаях, когда появляются так называемые силы инерции; и их возникновение обусловливается движением тел относительно космических масс.

Смелые идеи Маха, хотя и были всем известны, но они не обратили на себя должного внимания ученых: они казались парадоксальными и, по меньшей мере, излишними.

§ 12. Несколько слов о геометрии. Все мы учили в школе геометрию. Ее создатель — Эвклид, живший около 300 лет до Р. Хр. Она построена на нескольких аксиомах и, в элементарном изложении, состоит из двух частей· из геометрии на плоскости (планиметрия)

и геомегрии в пространстве (стереометрия). Первая из них трактует о различных свойствах прямых линий, углов, треугольников, четырехугольников, кругов и т. д., расположенных на какой-либо плоскости. Вторая, стереометрия, говорит о прямых линиях и плоскостях в пространстве, о различных «телах», вроде куба, цилиндра, конуса, шара и т. д. В виде примера геометрической теоремы, на которую нам еще придется ссылаться, приводим всем известную во всяком треугольнике сумма углов равна двум прямым углам (180°). Эта теорема верна на листе бумаги, на классной доске, на полу, и вообще на всякой плоскости.

Обратимся, однако, к поверхности шара, на которой кратчайшее расстояние двух точек определяется длиною дуги большего круга (центр его в центре шара), соединяющей данные две точки. Эти дуги играют на поверхности шара ту же роль, которую на плоскости играют прямые линии, как кратчайшие расстояния двух точек Если мы на поверхности шара начертим треугольник, стороны которого суть линии кратчайшего расстояния между его вершинами, т-е. дуги больших кругов, то сумма углов такого треугольника оказывается больше двух прямых. Это особенно ясно в случае, когда мы, напр, на глобусе начертим треугольник, одна вершина которого находится в полюсе Земли, а две другие расположены на экваторе, причем две стороны, совпадающие с двумя меридианами, взаимно перпендикулярны, а следовательно третья сторона есть одна четверть экватора. В таком треугольнике все три угла суть прямые, так что сумма его углов равна уже не двум, а трем прямым. Отсюда ясно, что эвклидова геометрия на плоскости оказывается неверной на поверхности шара, где существует совершенно другая геометрия. На поверхностях эллипсоида, яйцевидного тела и т д. господствует опять другая геометрия. Вообще, можно сказать, что почти каждая поверхность имеет свою геометрию. Однако, весьма важно заметить, что сравнительно очень малые участки любой поверхности могут представляться почти плоскими, так что отступления от эвклидовой геометрии остаются на таких малых участках незаметно малыми. Если бы, напр, земной шар имел совершенно гладкую поверхность, то участок в одну десятину можно было бы считать плоским и сумма углов треугольника, занимающего хотя бы целую десятину, незаметно мало отличалась бы от двух прямых.

Поверхности могут быть весьма разнообразны, и, соответственно им, существуют и разнообразные геометрии, вообще, отличающиеся друг от друга и от геометрии Эвклида, которая справедлива, прежде всего, для плоскости (планиметрия).

Поверхностей много, но пространство только одно, и к нему относится геометрия, созданная Эвклидом. Условимся называть такое пространство эвклидовым. Уже около ста лет тому назад некоторые великие математики поставили себе вопрос: нельзя ли чисто теоретически (математически) построить такое пространство, которое обладало бы совершенно другими свойствами, чем наше пространство, в котором, повидимому, оказывается справедливой именно геометрия Эвклида. Иначе говоря: можно ли теоретически построить не-эвклидово пространство, в котором бы эвклидова геометрия оказалась совершенно неверной и господствовала бы какая-то совершенно другая, не-эвклидова геометрия? Сюда относятся исследования нашего великого математика, проф. Лобачевского в Казани, исследования знаменитейших немецких ученых Гауса (Gauss) и Римана (Riemann), венгерца Больяй (Bolyai) и многих других ученых. Оказалось, что, теоретически, действительно можно построить разного рода не-эвклидовы пространства, имеющие, каждое, свою геометрию, подобно тому, как из различных поверхностей, вообще говоря, каждая имеет свою, ей присущую геометрию.

Если это так, то немедленно является фундаментальный вопрос: действительно ли наше пространство есть пространство эвклидово? Ведь возможно, что наше пространство вовсе не эвклидово пространство, но что в малых его участках уклонения его геометрии от эвклидовой незаметно малы, подобно тому, как на достаточно малых участках шаровой поверхности геометрия незаметно мало отличается от эвклидовой геометрии на плоскости. Так и предположил Гаус, который даже надеялся заметить такое уклонение путем непосредственных наблюдений. Для этого он выбрал в Германии три горы, расположенные так, чтобы с вершины каждой из них можно было видеть вершины двух других. Если эти три вершины мысленно соединить прямыми линиями, то получается большой треугольник. Пользуясь угломерными приборами, Гаус измерил три угла этого треугольника, надеясь, что сумма не окажется равной двум прямым, но будет, хотя бы и весьма мало, больше или меньше двух прямых, и что таким путем будет открыто уклонение нашего пространства от эвклидова. Однако, Гаус уклонения не нашел; сумма углов треугольника оказалась, в пределах возможных ошибок измерений, равной двум прямым. Над Гаусом, в ту пору, втихомолку посмеивались. Теперь мы знаем, что Гаус был прав. Наше пространство, как мы увидим, действительно не-эвклидово, но уклонения так малы, что они не могли обнаружиться на том, слишком малом участке пространства, в котором Гаус производил свои измерения. Если бы Гаус, вместо треугольника, соединяющего

вершины трех, сравнительно близких друг другу гор, мог взять треугольник, образованный Солнцем и двумя весьма удаленными от него и друг от друга звездами, и измерить его углы, то он нашел бы заметное уклонение от двух прямых.

§ 13. Мировое пространство конечно или бесконечно?

Этот вопрос издавна занимал мыслителей. Прежде, чем приступить к его рассмотрению, мы должны указать, что слово «конечный» можно понимать двояко. Мы будем называть конечным в буквальном смысле слова все то, что имеет начало и конец, отчетливо вырисовывающиеся перед нами, так, что мы их можем непосредственно указать или, по крайней мере, ясно себе представить. В этом смысле, очевидно конечны длина, ширина и высота, или вообще размеры всевозможных тел, поверхности различных государств, поверхности озер и морей, длина и ширина рек, горных хребтов и т. д. Все это буквально конечно, имеет начало и конец, или, если угодно, два конца, еще проще об этих примерах можно сказать, что они имеют определенные границы, что они там-то и там-то кончаются. О другом значении слова «конечный» будет сказано ниже.

Условившись понимать термин «конечный» в таком буквальном смысле, мы возвращаемся к вопросу: мировое пространство (вселенная) конечно или бесконечно? Прежде всего, совершенно ясно, что пространство не может быть конечным в только что указанном обыденном или буквальном смысле слова. Оно, очевидно, не может где-то кончаться и притом со всех сторон, куда бы мы мысленно ни направились. Оно не может быть ограничено чем-то вроде стены, ибо всякий спросит: что же находится за этой стеной? Но пространство не может быть и бесконечным, как по отвлеченным причинам, так и по реальным, основанным на соображениях астрономического характера. Дело в том что утверждение «пространство бесконечно» — это пустые слова, лишенные всякого положительного содержания, ибо в них содержится только отрицание конечности. Астрономия же приводит к следующим выводам. Допуская, что пространство бесконечно, мы можем, далее, предположить, что во всех его частях распределены звезды примерно так, как в той его части, которая доступна нашему непосредственному наблюдению. Общее число звезд было бы бесконечно велико. Однако, простое вычисление показывает, что в этом случае весь небесный свод должен быть покрыт приблизительно равномерным ярким свечением, которого, в действительности, не наблюдается. Если же допустить, что звезды как бы скучены в одном месте или в конечном

числе мест бесконечного пространства, то они должны были бы рассеяться в этом пространстве. подобно тому, как частицы небольшего количества газа, помещенного в большой пустой сосуд, рассеиваются по всему объему этого сосуда.

Итак, пространство не может быть ни конечным в обыкновенном, буквальном смысле слова, ни бесконечным. И вот, уж очень давно, возникла мысль: не существует ли нечто третье? И на такое третье было указано, причем в основу клалось рассуждение по аналогии.

Вообразим себе сперва окружность, которая, как и всякая линия, обладает одним измерением, а именно длиною; ее ширина и толщина равны нулю. Как мы должны ответить на вопрос о конечности или бесконечности окружности? Она, очевидно, не обладает бесконечною длиною; но ее нельзя признать и конечной в вышеуказанном буквальном смысле слова, ибо она нигде не кончается. Ее, несомненно, все-таки следует признать конечной, хотя у нее нет концов, но это уже будет конечность другого рода, чем та, о которой мы до сих пор говорили. Где же кроется источник этого странного свойства окружности? Он заключается в той **кривизне**, которою обладает окружность и благодаря которой окружность **замкнута в самой себе.** Из этого вытекают еще два следствия. Во-первых если, начиная от какой-либо точки окружности, итти вдоль этой окружности все дальше и дальше, то мы возвратимся к исходной точке. Во-вторых. все точки окружности играют одинаковую роль и каждая из них может быть названа центральной. Чтобы понять смысл этих слов, представим себе какую-нибудь кривую линию, соединяющую две точки A и B, которые служат концами этой кривой. Произвольная третья точка на той же кривой будет, вообще говоря, лежать ближе к одному концу кривой, чем к другому, и только одна точка, находящаяся на равных расстояниях об обоих концов, может быть названа центральной. Геометрический центр окружности находится внутри ее, но мы все-таки можем сказать, что каждая точка окружности есть точка центральная в том смысле слова, что если от нее итти вдоль окружности сперва в одну сторону, потом в другую, то никакой разницы не обнаружится — окажется полнейшая симметрия. Заметим еще, что кривизна окружности тем больше, чем меньше радиус, а след. и вся длина окружности. Когда радиус очень велик (экватор Земли), то кривизна незначительна и сравнительно большой отрезок окружности может быть принят за прямую линию (одна верста экватора). Кроме окружности, существует, очевидно, еще беспредельно большое число других замкнутых кривых линий, напр,. всем известный эллипс (см ниже, черт. 5). Про такие кривые мы можем сказать, что они в различных местах обладают неодинаковой

кривизной. Обратимся теперь к поверхности шара. Про нее также можно сказать, что она не бесконечно велика, но и не конечна в обыкновенном, буквальном смысле слова, так как нельзя указать ее концов, т.-е. тех границ, у которых она бы кончалась. И все-таки всякий скажет, что она конечна, но уже в другом смысле слова. Источником такого свойства поверхности шара опять-таки служит кривизна, благодаря которой она замкнута в самой себе. Если выйти из какой-либо точки шаровой поверхности и итти все дальше и дальше, не меняя направления, т.-е. двигаясь по окружности большого круга, центр которого совпадает с центром шаровой поверхности, то мы вновь возвратимся к исходной точке. Только что упомянутый геометрический центр шаровой поверхности находится внутри шара Но аналогично тому, что сказано было выше, мы можем каждую точку шаровой поверхности считать центральной, так как эта поверхность расположена симметрично во все стороны, куда бы мы ни направились от данной точки Кроме шаровой, может быть еще беспредельное число замкнутых поверхностей, напр., поверхность яйца Такие поверхности обладают в различных местах неодинаковою кривизною. Кривизна шаровой поверхности тем меньше, чем больше ее радиус. Когда радиус очень велик (поверхность Земли), то кривизна незначительна, и сравнительно большой отрезок поверхности может быть принят за плоскость (квадратная верста поверхности Земли). Поверхность шара обладает подобно плоскости, двумя измерениями, так как на ней можно выделить часть, имеющую длину и ширину, но толщина поверхности равна нулю.

Мы видим, что окружность (одно измерение) и шаровая поверхность (два измерения) обладают аналогичными свойствами. Они ни бесконечны, ни конечны в буквальном смысле слова (нет концов или границ), но они все-таки конечны в другом смысле. Обе замкнуты в самих себе благодаря тому, что они обладают кривизной. В обеих мы, идя все дальше и дальше, возвращаемся к исходной точке.

Мы видели, что по вопросу о пространстве перед нами стоит, повидимому, неразрешимая дилемма: оно не может быть ни бесконечным, ни конечным, т.-е. со всех сторон ограниченным. И вот, еще в первой половине истекшего столетия был поставлен смелый вопрос: не обладает ли пространство, в своих трех измерениях, свойствами, аналогичными выше разобранным свойствам окружности с ее одним, и шаровой поверхности с ее двумя измерениями? Нельзя ли допустить, что оно ни бесконечно, ни конечно (в обыденном смысле слова), но замкнуто в самом себе? Это возможно только, если пространство, по своей внутренней, для нас скрытой, структуре обладает внутренней

кривизной. Если это так, то, во-первых, все точки пространства суть точки центральные, во-вторых, луч света, распространяющийся от одной точки до другой по кратчайшей линии, должен возвратиться к тому месту, от которого он вышел

Теперь мы пришли к тому месту, где, как в начале было сказано, «собака зарыта» Кто не привык к высокой степени абстрактного мышления, скажет, что он не в состоянии себе представить, как это пространство может обладать «внутреннею кривизной», как оно может быть «замкнутым в самом себе» Да! здесь сущность той причины, которая столь многих заставляет утверждать, что они «не могут понять» нового учения Эйнштейна. Все дело в том, чтобы убедиться, что реально может существовать или происходить то, чего мы, даже приближенно, представить себе не можем, так как оно безусловно находится вне пределов человеческого разумения. А чтобы читатели могли в этом убедиться, мы просим их дать волю своей фантазии и любезно последовать за нами в особого рода царство теней.

Вообразим себе поверхность огромного шара, напр., такого, как Солнце, она в десять тысяч раз больше поверхности земного шара. Положим, что эта поверхность совершенно ровная (гладкая), что на ней нет ни возвышений, ни углублений. В этой поверхности живут крошечные, интеллигентные, мыслящие существа, и притом существа двух измерений, не трех измерений, как мы — люди. Они обладают длиной и шириной, но их толщина равна нулю. Они никакого пространства не занимают, они живут не на поверхности, но в этой поверхности. Их можно уподобить обыкновенной тени, которая, очевидно, также никакой толщины не имеет, но это тени живые, двигающиеся, наблюдающие и мыслящие.

Они видят и знают только ту поверхность, в которой они живут и которая и есть их мир, их вселенная. Их органы так устроены, что они о пространстве никакого понятия не имеют и такового себе никоим образом представить не могут. Мы предположим, что они живут исключительно только на весьма малой части своей вселенной, т. е. шаровой поверхности. Если последняя, как мы положили, по величине равна поверхности Солнца, то для них обитаема, скажем, одна квадратная верста. Они знают, что их мир тянется за пределы этой квадратной версты, но проникнуть в него они, по какой-либо причине, не могут.

Между ними являются великие ученые; является Эвклид и создает геометрию, которая тождественна с нашей геометрией на плоскости, так как квадратная верста на поверхности солнца незаметно мало отличается от плоскости. Они знают, что сумма углов треугольника равна двум прямым и они хорошо знакомы со свойствами окружности. Они

также ставят вопрос о конечности или бесконечности того мира в котором они живут и лишь крошечную часть которого они могут непосредственно исследовать.

Между ними являются великие математики, которые ставят вопрос о возможности не-эвклидовой геометрии и приходят к выводу, что можно теоретически придумать такие миры, конечно миры *двух* измерений, в которых существует совершенно другая геометрия и, напр., сумма углов треугольника не равна двум прямым. Возникает мысль, что их мир может быть и не-эвклидовым, но так мало отличается от эвклидова. что уклонения не могут быть подмечены. Но один из великих ученых — назовем его Гауссом — даже измеряет углы весьма большого треугольника, чтобы узнать, равна ли их сумма двум прямым. Он отступления от двух прямых не находит, и над ним втихомолку подсмеиваются; между тем мы знаем, что он прав, что он действительно нашел бы отступления, если бы он смог измерить углы треугольника, размеры которого превышали бы во много тысяч раз размеры всей обитаемой части мира этих теней, и что треугольник, который он измерил, был слишком мал, чтобы на нем могло обнаружиться уклонение от геометрии Эвклида.

На вопрос о конечности или бесконечности их мира, ученые тени отвечают, что он ни бесконечен, ни конечен в обыденном, буквальном смысле слова, но что он замкнут в самом себе и что это связано с тем, что он обладает внутренней кривизной. Они, далее, утверждают, что если бы можно было итти все дальше и дальше, за пределы обитаемой части их мира, то пришлось бы возвратиться к исходной точке. Чтобы свои взгляды и выводы сделать несколько более понятными и как бы наглядными, ученые тени указывают на *аналогию* с окружностью, относительно которой всем теням понятно, что она ни бесконечна, ни конечна в буквальном смысле слова, обладает кривизной и замкнута в самой себе. Но другие тени не соглашаются; они отвергают новое учение, указывая, что хотя свойства окружности им ясны и понятны, они совершенно не могут себе «*представить*», что их мир обладает внутренней кривизной и замкнут сам в себе. На это ученые им отвечают: да, вы правы, мы этого представить себе не можем и потому оно остается нам непонятным Но напрасно вы настаиваете на том, чтобы вы непременно могли себе представить кривизну и замкнутость нашего мира. Вы требуете невозможного! Но из того, что мы не можем себе представить кривизны и замкнутости нашего мира, вовсе не следует, что мир этими свойствами не обладает. Эти свойства следует принять как факт и на нем строить правильное понимание нашего мира.

Мы, люди, с высоты нашего трехмерного величия, знаем, что те ученые тени правы, нам известно и понятно, что их мир есть шаровая поверхность, замкнутая в самой себе благодаря тому, что она обладает кривизной, которая тем меньше, чем больше радиус шаровой поверхности. И мы знаем, далее, что эвклидова геометрия лишь приблизительно верна на малых участках их мира

Читатели, последовавшие за нами в сказочный мир живых, мыслящих теней, легко сами придут к тому выводу, который мы имели в виду, предприняв эту экскурсию. Что наш мир замкнут в самом себе, что он обладает внутренней кривизной, благодаря особенностям своей внутренней структуры — этого мы, действительно, представить себе не можем и мы не должны требовать такой возможности. Но можно итти еще дальше и поставить вопрос: какое право имеем мы предполагать, что все, что во вселенной существует или происходит, непременно должно быть доступно нашему отчетливому представлению, должно находиться внутри горизонта нашего понимания и разумения? И не является ли такое предположение опасным пережитком, бессознательным для нас отголоском того высокомерия, той мании величия, которая выростала из мысли, что человек есть центр вселенной, царь природы, всеобъемлющему разуму которого должно быть доступно все, что существует и что происходит? Не приличествует ли нам стать на более скромную позицию (о, друг Гораций...), допустив возможность существования таких границ нашего разума, наших представлений и даже нашей фантазии, через которые нам не дано перешагнуть? Вспомним о живых тенях в шаровой поверхности. Мысль о возможной кривизне и замкнутости мирового пространства мы должны принять как допустимый исход из мучительной дилеммы, как единственное решение старого, «проклятого» вопроса о конечности или бесконечности пространства.

В трех последних параграфах мы познакомились с теми тремя вопросами, которые мы назвали до-эйнштейновскими, так как они возникли много раньше появления общего принципа относительности, для которого они, однако, имеют огромное значение. Для удобства мы еще раз вкратце напомним сущность этих трех вопросов.

I. Идея Маха. Вращение не есть движение абсолютное, но представляет движение относительное, а именно — относительно совокупности отдаленных космических масс. Силы инерции, центробежная сила, сплющивание вращающегося жидкого шара — вызываются наличностью тех же отдаленных масс и появляются при всяком движении тел относительно этих масс.

II. Идеи Лобачевского, Гауса и Римана. Эвклидова геометрия в пространстве есть одна из возможных геометрий. Мы не можем

знать, живем ли мы в эвклидовом пространстве, или в таком пространстве, геометрия которого так мало отличается от геометрии Эвклида, что на сравнительно малых участках пространства отступления не могут быть замечены, подобно тому, как геометрия на малых участках, напр., шаровой поверхности, незаметно мало отличается от эвклидовой геометрии на плоскости.

III. Идеи о пространстве. Из дилеммы о конечности и бесконечности пространства можно найти выход, если допустить, что оно замкнуто в самом себе, обладая внутренней кривизной, так что луч света, исходящий, напр., от звезды, должен возвратиться к своему источнику, причем, впрочем, должны быть соблюдены условия, о которых будет сказано ниже.

§ 14. Основы общего принципа относительности.

История возникновения общего принципа относительности (1915 г.) существенно отличается от истории специального принципа (1905 г.), которая была изложена на предыдущих страницах. Вспомним, что в основе специального принципа лежат опыты и наблюдения Майкельсона и других ученых, незыблемо установивших, что движение Земли не может отражаться ни на каких физических явлениях, происходящих в окружающем ее пространстве, не исключая явлений световых; в частности, эти наблюдения твердо установили, что на движущейся Земле скорость света одинаковая по всем направлениям. Этот факт Эйнштейн объяснил, лишив время той абсолютности, которая ему молчаливо, можно сказать — бессознательно, приписывалась. Изменив основное представление о времени, а в связи с этим также представление о размерах и о форме тел, Эйнштейн строго логически построил новое учение. Все выводы этого учения были, где это оказалось возможным, проверены, причем обнаружилось полное их согласие с действительностью. Таким образом, прочной основой специального принципа служит твердо установленный факт, реальность которого не может вызывать никаких сомнений. Это та пружина, которая двинула Эйнштейна на путь новых исследований, на путь научной творческой работы.

Совершенно другой характер имеет история возникновения общего принципа относительности. Его фундамент состоит из двух частей. Первую и, пожалуй, главнейшую часть составляет определенная, предвзятая мысль Эйнштейна, которая ни на чем не основана, кроме внутреннего убеждения гениального творца нового миропонимания. Второю, почти столь же важною частью является один элементарнейший факт экспериментальной физики, давным-давно известный и упо-

минаемый во всех, даже самых элементарных учебниках физики, а именно, что в пустоте все тела падают одинаково быстро. Огромное и глубокое значение этого факта не было сознано учеными, и только Эйнштейн, первый, сосредоточил на нем свое внимание и понял его значение. Итак, некоторая предвзятая мысль и давно известное элементарное физическое явление в новом освещении — вот те две части фундамента общей теории относительности. К их рассмотрению мы теперь и приступим.

Как сказано, первую и главную часть фундамента общей теории относительности, первую пружину, двинувшую Эйнштейна на долгий путь новой творческой работы, составляла некоторая мысль, выражавшая потребность дополнить и исправить то, что ему представлялось незаконченным и неудовлетворительным с точки зрения теории познания. Исходя из предвзятой мысли, не вытекающей логически из чего-либо данного, исходя из мысли, в справедливости которой он был априорно убежден, Эйнштейн построил новую картину мира и вывел все следствия, из нее вытекающие. Эти следствия необходимо было проверить; они оказались соответствующими действительности, и на этом основана громкая слава Эйнштейна.

В чем же заключается исходная мысль Эйнштейна? Она очень проста он полагал, что принцип относительности должен иметь более общий характер, чем тот, который выражается рассмотренным нами специальным принципом, установленным в 1905 г. Припомним еще раз, как этот последний выражается: мир так устроен, что физические явления происходят совершенно одинаково во всех системах (лабораториях), относительное движение которых прямолинейное и равномерное. Вот это-то последнее ограничение и показалось Эйнштейну неприемлемым Оно его не удовлетворяло, не соответствовало тем требованиям познания, которые он ясно чувствовал и которые властно требовали обобщения специального принципа относительности, ограниченного узкими рамками специально только прямолинейных и равномерных относительных движений.

И вот, Эйнштейн высказал общий принцип относительности мир устроен так, что должно оказаться возможным выразить законы всех физических явлений в такой форме, чтобы они были справедливы для всех систем, каково бы ни было их относительное движение. Движение может быть криволинейное, ускоренное, замедленное, вращательное. Находясь на одной из систем, наблюдатель видит, что другие системы совершают самые разнообразные движения; но законы физических явлений выражаются во всех системах совершенно одинаково.

Эта мысль играет роль постулата. Доказать ее справедливость т.-е показать, что она вытекает, как логически необходимое следствие, из чего-либо известного или принятого, конечно, нельзя. Она ни на чем не основана, кроме внутреннего убеждения творца нового миропонимания, Эйнштейна. Надо посмотреть, какие следствия вытекают из этого постулата, и затем путем опытов и наблюдений решить, подтверждаются ли они в действительности.

§ 15. Весомая масса и инертная масса. Переходим ко второй части фундамента общей теории относительности. В § 10 мы говорили вообще о массе данного тела. Мы видели, что если определенная по величине сила действует на различные тела, то ускорения, приобретаемые этими телами, т.-е. увеличения скоростей их движений в единицу времени, напр., в одну секунду, обратно пропорциональны их массам; чем больше масса тела, тем меньше изменение скорости. Чтобы заставить различные тела двигаться с одинаковым ускорением, необходимо на них действовать силами, прямо пропорциональными их массам; чем больше масса тела, тем больше должна быть, в этом случае, действующая на него сила. Массу, о которой здесь говорится, мы теперь назовем инертной массой данного тела. Во всех случаях, когда проявляется та инерция тел, о которой было говорено в § 11, мы имеем дело с массой инертной. Сюда относится и центробежная сила, вызывающая, напр., сплющивание жидкого шара.

Оказывается, однако, что термин «масса» встречается, даже в самых элементарных учебниках физики, не только там, где рассматривается движение тел под влиянием действующих на них сил, но еще в другом месте, а именно там, где говорится о взаимном притяжении тел, о всемирном тяготении, которое еще называется гравитацией. Всем известен закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном: сила взаимного притяжения двух тел, находящихся на заданном друг от друга расстоянии, пропорциональна произведению масс этих тел. Это значит, что увеличение или уменьшение любой из двух масс вызывает такое же изменение силы их взаимного притяжения. Если, не меняя расстояния между двумя телами, увеличить массу одного из них в 3 раза, а другого в 5 раз, то притяжение между ними увеличится в 15 раз. Зависимость силы притяжения двух тел от расстояния между ними мы здесь не рассматриваем. Примером гравитации может служить сила тяжести, т.-е. та сила, с которою Земля притягивает все тела, и которая определяется весом тел. Назовем ту массу, о которой говорится в законе Ньютона, грави-

тационной, тяготеющей, или, просто, весомой массой, так как она измеряется весом тела.

Из предыдущего ясно, что понятия об инертной и весомой массе данного тела представляются нам настолько различными по существу, что нет никакого повода подозревать существования какой-либо между ними связи. Действительно! Инертная масса определяет поведение тела под влиянием действующих на него сил, а именно величину ускорения, когда дана сила, или величину силы, которая необходима, чтобы вызвать данное ускорение; весомая же масса определяет величину той силы, с которой данное тело притягивается другими и, с своей стороны, притягивает эти тела. Эти два определения говорят нам о двух совершенно различных явлениях, между которыми не видно ни малейшей связи. Ясно, что, зная отношение друг к другу инертных масс двух тел, мы ровно ничего не можем сказать о том, как относятся друг к другу весомые массы тех же тел, и наоборот. Зная, что под влиянием данной силы первое из каких-либо двух тел приобретает в три раза большее ускорение, чем второе, мы ничего не можем сказать о том, во сколько раз первое тело притягивается сильнее или слабее произвольным третьим телом, чем второе.

Однако, существует один элементарнейший, давным-давно и всем известный закон, который раскрывает перед нами связь между инертной массой и весомой массой. Он относится к падению тел в пустоте (сопротивление воздуха, влияющее на падение тел, должно быть исключено, как случайное и постороннее действие) и гласит: все тела падают (в пустоте) одинаково быстро, т.-е. с одинаковым ускорением. Мы видели, что одинаковое ускорение приобретается различными телами, если действующие на них силы пропорциональны их инертным массам Но в случае свободного падения тел, на них действует ньютоновская сила тяготения, т.-е. сила, с которой эти тела притягиваются Землей, а эта сила пропорциональна весомой массе тел. Таким образом мы получаем, на основании закона падения тел, такой результат сила тяжести, действующая на тела, или, что то же самое, вес тел одновременно пропорционален, как весомой, так и инертной массе этих тел. Отсюда следует, что весомая масса и инертная масса различных тел друг другу пропорциональны. Действительно, положим, что мы имеем два тела, и что весомая масса первого в три раза больше весомой массы второго; это значит, что первое в три раза сильнее притягивается Землей, чем второе, вследствие чего первое в три раза сильнее давит на чашку весов, чем второе, или, проще, вес первого в три раза больше веса

второго. Однако, при свободном падении (в пустоте) оба тела падают с одинаковым ускорением, откуда мы заключаем, что инертные массы этих тел относятся между собой, как действующие на них силы, т.-е. что инертная масса первого тела также в три раза больше инертной массы второго *).

Мы можем, независимо друг от друга и существенно различными способами, сравнить между собой инертные массы различных тел (напр., измеряя силы, придающие этим телам одинаковые ускорения), а также весомые массы тех же тел (напр., измеряя силы, с которыми они притягиваются Землей, т.-е. просто взвешивая тела). Отсюда следует, что мы можем те и другие измерить, произвольно выбрав единицы, как инертной, так и весомой масс. Ни что нам не мешает избрать какое-либо определенное тело, напр., кубический сантиметр чистой воды при 4° Ц., и принять за единицы как его инертную, так и его весомую массу. Ясно, что при таком выборе единиц мы для всех тел получаем одинаковые численные значения для инертной и для весомой массы. Это можно упрощенно выразить словами: инертная и весомая массы тел равны между собой.

Мы видим, что этот результат получился на основании того, что все тела падают (в пустоте) одинаково быстро, или, выражаясь точнее, с одинаковым ускорением. Однако, может возникнуть сомнение в справедливости последнего утверждения, доказать которое, очевидно, очень трудно, или даже невозможно. Совершенную пустоту невозможно получить даже при помощи самых лучших воздушных насосов. Необходимо заставить падать различные тела внутри закрытой со всех сторон длинной, вертикально установленной трубы, а при таких условиях нельзя надеяться достичь большой точности при измерении времени падения различных тел. Но если закон, который мы положили в основу наших рассуждений, не может быть проверен с убедительною точностью, то остается сомнительным и наш вывод, касающийся равенства инертной и весомой масс. К счастью, дело обстоит иначе. Венгерский ученый Этвеш (Eötvös, † 1919) доказал в 1870 г. это равенство путем опытов, которые, по достигнутой ими точности, почти не имеют себе равных в области физических исследований. Этвеш построил сложный прибор, при помощи которого он мог сравнить силу тяжести, действующую в данном месте на какое-либо тело, с центробежной силой, влияющей на то же самое тело вследствие вращения Земли около ее оси. Первая сила пропорциональна весомой массе тела, а вторая—его инертной массе. Оказалось, что отношение этих двух сил для всех тел со-

*) Примечание 10.

вершенно одинаково, а отсюда уже следует, что инертная и весомая массы различных тел друг другу пропорциональны, или, при указанном выборе единиц той и другой, равны между собою.

До второй работы Эйнштейна (1915 г.) отношение ученых к факту равенства весомой и инертной масс могло быть характеризировано следующим образом. Понятие о массе вводилось, прежде всего, при рассметрении движения тел под влиянием каких-либо сил. Здесь, очевидно, речь шла об инертной массе, но слово «инертная» обычно не прибавлялось, а говорилось просто о «массе». Затем рассматривалось взаимное притяжение тел, и приводился закон всемирного тяготения в той формулировке, которую ему дал Ньютон, и в которой говорится, что сила тяготения пропорциональна массам притягивающихся тел, тем самым массам, о которых раньше говорилось в учении о движени тел под влиянием приложенных к ним сил.

Термин «весомая масса» обычно не вводился. Принимался факт, что тяготение пропорционально массе, и на него смотрели, как на специальную особенность этой мировой силы. Ведь силы бывают разные, и действуют они по различным законам. Отчего же не быть и такой силе, которая пропорциональна массе тела, на которое она действует? Такая сила нашлась — сила тяготения и на это смотрели, как на приятную случайность, приводящую к тому, что, напр., все тела падают в пустоте с одинаковым ускорением, и что основные формулы теории движения небесных светил принимают сравнительно весьма простой вид. Эйнштейн, первый, взглянул глубже на вопрос о равенстве инертной и весомой масс и сделал из него важную часть фундамента своего нового учения, а тем самым и всей физики.

§ 16. Принцип эквивалентности. Равенство весомой и инертной масс послужило Эйнштейну исходной точкой для дальнейших заключений, с одним из которых мы теперь и познакомимся. Вообразим себе систему в виде большого ящика, или комнаты, и положим сперва, что она находится в «гравитационном поле», т.-е. в такой части пространства, в которой действуют силы тяготения, и что она в этом пространстве неподвижна. В виде примера, представим себе, что она находится на земной поверхности, где гравитация, т.-е. сила тяжести, действует вертикально вниз, от потолка к полу комнаты. Наблюдатели, находящиеся в этой системе, замечают следующее. Тела, спокойно лежащие на полу, на столе и т.-д., производят давление на тела, находящиеся под ними. Если взять в руку какое-либо тело, напр., свинцовый шарик,

и отпустить его, то он начнет падать вертикально вниз с ускорением, которое мы обозначим буквой g, и которое оказывается не зависящим от рода тела, если исключить сопротивление воздуха. Если шарик бросить в горизонтальном направлении, то он начнет двигаться по кривой линии (по параболе) вниз, и на некотором расстоянии от наблюдателя достигнет пола. В обоих случаях мы имеем дело с весомой массой взятого тела.

Теперь рассмотрим другой случай. Та же система находится в пространстве, в котором нет никакого гравитационного поля, но сама система движется с ускорением g по направлению, обратному тому направлению, в котором раньше действовала гравитация, т.-е. по направлению от пола к потолку. Эйнштейн иллюстрирует этот случай тем, что к центру потолка комнаты, с наружной его стороны, приделан канат, на который действует постоянная сила, вследствие чего весь ящик и движется прямолинейно с постоянным ускорением, которое оказывается равным ускорению тела, свободно падавших в прежде существовавшем гравитационном поле. Наблюдатель, находящийся внутри системы, замечает следующее. Все тела, спокойно лежащие на неподвижных предметах (пол, стол, рука), производят давление на свои опоры; такое же давление производит и сам наблюдатель, хотя бы на пол ящика. Если наблюдатель выпустит из руки какой-либо предмет, напр, свинцовый шарик, то он увидит, что шарик движется по направлению к полу с ускорением g, между тем, как наблюдателю, находящемуся вне ящика, тот же шарик представится неподвижным. Если наблюдатель бросит шарик по направлению, параллельному полу, то он заметит, что шарик движется по кривой линии и на некотором расстоянии ударяется об пол. Наблюдателю, находящемуся вне ящика, представится, что шарик движется прямолинейно и равномерно по направлению, параллельному полу. Ясно, что для этого наблюдателя движение происходит по инерции и зависит от инертной массы шарика.

Сравнивая явления, наблюдаемые в указанных двух случаях внутри системы, мы видим, что они вполне тождественны, хотя в первом случае они зависят от весомой массы тел, а во втором случае—от массы инертной. Наблюдатель, находящийся внутри ящика, не имеет возможности отличить эти два случая друг от друга, и он, напр., во втором случае, не зная про канат и про действующую на него силу, может предположить, что внутри ящика действует гравитационное поле. Все изложенное приводит нас к результату огромной важности. Наблюдатель, находящийся внутри системы, не имеет возможности отличить друг от друга прямолинейного, равномерно

ускоренного движения системы от наличности, внутри системы, гравитационного поля. Все явления происходят внутри системы совершенно одинаково в обоих случаях. Мы можем сказать, что гравитационное поле и равноускоренное прямолинейное движение системы друг другу эквивалентны. В этом и заключается введенный Эйнштейном принцип эквивалентности.

Мы видим, как тесно связана эта эквивалентность с фактом равенства инертной и весомой масс. Если бы эти две массы не были равны между собой, то наблюденные движения тел были бы, в двух рассмотренных случаях, неодинаковы, и наблюдатели могли бы отличить наличность гравитационного поля от прямолинейного равноускоренного движения системы даже на тех простых, чисто механических явлениях, о которых было выше сказано. Однако, Эйнштейн идет дальше; он обобщает принцип эквивалентности, относя его ко всем вообще физическим явлениям, наблюдаемым внутри системы. Он утверждает, что наблюдатель, находящийся внутри системы, никакими наблюдениями каких бы то ни было физических явлений не может отличить равномерное гравитационное поле, действующее внутри системы в каком-либо направлении, от равноускоренного прямолинейного движения системы в направлении противоположном. К таким физическим явлениям могут относиться также и всякого рода явления световые, электрические и т. д. Для Эйнштейна эквивалентность настолько полна, что он вообще всякое ускорение системы отождествляет с возникновением гравитационного поля. Заметим, впрочем, что хотя всякую причину, вызывающую ускорение системы, можно заменить возникновением гравитационного поля, но—не наоборот. Если сила тяготения в различных местах данного пространства имеет неодинаковое направление, то гравитация в системе не может быть заменена прямолинейным равноускоренным движением самой системы. Так, напр., гравитационное поле земного шара, в его целом, такой замене, очевидно, подвергнуто быть не может. Но, каково бы ни было гравитационное поле, всегда можно достаточно малую его часть считать за поле равномерное, и такая часть, если она расположена внутри какой-либо системы, может во всех отношениях быть заменена прямолинейным равноускоренным движением самой системы.

В § 14 мы формулировали общий принцип относительности; покажем теперь, что изложенное в § 15 о равенстве инертной и весомой масс и тесно связанный с этим равенством принцип эквивалентности могут быть рассматриваемы, как необходимое следствие общего принципа

относительности. Последний говорит нам, что физические явления происходят одинаково во всех системах, каково бы ни было их движение. Это значит, напр, что наблюдатель замечает совершенно одинаковые явления, как бы ни двигалась система, в которой он находится, если только те относительные движения, с которыми связано данное явление, остаются без изменения. Специальный принцип относительности утверждал то же самое, но исключительно только для прямолинейных и равномерных относительных движений систем. Для него, как и для старого принципа относительности Ньютона, всякое ускорение движения имеет характер абсолютный. Общий принцип относительности отрицает абсолютность ускорения, приписывая и ему характер чего-то относительного. Обратимся к примеру шарика, падающего в системе, которая покоится в гравитационном поле, напр., стоит неподвижно на поверхности земли. Шарик падает вниз, и его ускорение g, определяемое наблюдателем, находящимся внутри системы, считалось в классической механике абсолютным. Шарик падает по направлению к неподвижной Земле, с которой связана сама система; причиной ускорения g мы считаем гравитационное поле Земли. Общий принцип относительности утверждает, что закон явления не должен измениться, если шарик и Земля с системой на ней обменяются ролями, т.-е. если Земля и система (ящик) будут двигаться с ускорением g по направлению, противоположному направлению падения шарика, т. е. вверх, между тем, как шарик остается неподвижным или движется прямолинейно и равномерно; гравитационного поля в этом случае не существует. В первом случае мы имеем дело с весомой массой шарика, во-втором—с его массой инертной. Во втором случае наблюдаемое внутри системы движение шарика, очевидно, не зависит от его состава, размеров и формы. То же самое должно, согласно общему принципу относительности, быть верным и в первом случае. Отсюда следует, что в гравитационном поле все тела должны падать одинаково, или — что (при надлежащем выборе единиц, см. стр. 67) весомая и инертная массы всякого тела должны быть равны между собой. Таким образом выясняется глубокое значение элементарного закона падения всех тел (в пустоте). Этот закон и связанное с ним равенство весомой и инертной масс вытекают, как логическое следствие, из общего принципа относительности. На опыты Этвеша, доказавшие равенство двух масс, можно теперь смотреть, как на подтверждение одного из выводов общего принципа относительности, в пользу справедливости которого они, во всяком случае, говорят. Все изложенное заставляет нас догадываться, что должна существовать тесная связь между принципом относительности и проблемой всемирного тяготения.

§ 17. Чем мы должны ограничиться. В § 14 мы указали на главную часть фундамента общей теории относительности, на предвзятую мысль Эйнштейна, формулировку которой мы здесь еще раз повторим. мир устроен так, что должно оказаться возможным выразить законы всех физических явлений в такой форме, чтобы они были справедливы для всех систем, каково бы ни было их относительное движение В § 15 была рассмотрена другая часть фундамента. Ее сущность вытекает из закона, гласящего, что в пустоте все тела падают с одним и тем же ускорением; она может быть сведена к тому, что весомая и инертная массы всякого тела равны между собой. Принцип эквивалентности показал нам затем глубокую связь между двумя частями фундамента нового учения Эйнштейна. На равенство весомой и инертной масс, доказанное чрезвычайно точными опытами, можно смотреть, как на необходимое следствие, вытекающее из общего принципа относительности, а след. и как на факт, говорящий в пользу этого принципа.

Допустив справедливость основной мысли в ее выше приведенной формулировке, Эйнштейн увидел перед собой грандиозную задачу ответить на вопрос: как же должен быть устроен мир, какими он должен обладать внутренними свойствами и какие должны в нем происходить явления, если основная мысль верна?

В течении десяти лет Эйнштейн работал над построением такого мира, для которого был бы справедлив общий принцип относительности, т.-е. такого мира, в котором все законы физических явлений формулировались бы совершенно одинаково, как бы ни двигались системы, в которых эти явления происходят и наблюдаются. Ему пришлось встретиться с неимоверными трудностями, с одной стороны — идейного, с другой — математического характера. От времени до времени он опубликовывал предварительные результаты своих изысканий. Следившие за его работой математики сомневались, чтобы ему удалось преодолеть огромные математические трудности; однако Эйнштейн их преодолел и в 1915-ом году новое научное здание было, в главных чертах, закончено.

Изучение общего принципа относительности требует долгого, усидчивого труда и предварительного изучения такого отдела математики, с которым вряд ли кто-нибудь был знаком, кроме специалистов-математиков. Даже физики-теоретики, прекрасно владеющие теми отделами математики, которые находили себе применение при теоретической разработке вопросов физики, оказались незнакомыми с «алгеброй тензоров», как называется та часть математики, на применении которой всецело

построено учение Эйнштейна. Всем, занимавшимся специально физикой и, конечно, пожелавшим познакомиться с новым учением, пришлось засесть за учебник и прежде всего познакомиться с весьма сложной «алгеброй тензоров», а затем уже приступить к главному, к изучению работ Эйнштейна.

Из сказанного явствует, чем мы должны ограничиться, намереваясь и этой книжечке представить общий принцип относительности в таком изложении, которое было бы доступно ныне несомненно весьма обширному кругу лиц, слыхавших об этом принципе, о том огромном значении, которое ему придают, о новом миропонимании, т.-е. о новой картине мира, к которой он приводит, и о той мировой славе, которую приобрел творец нового учения, Альберт Эйнштейн. Ясно, что мы принуждены ограничиться, если можно так выразиться, началом и концом, т.-е. фундаментом и окончательными результатами и выводами.

В предыдущих параграфах мы старались выяснить, на каком фундаменте построен общий принцип относительности: предвзятая мысль, выраженная в виде постулата и, как существенное к нему подспорье, закон падения тел или, что то же самое, закон равенства весомой и инертной масс. На этом фундаменте построил Эйнштейн новое научное здание. Но следить за этой постройкой может, как было сказано, далеко не всякий специалист по физике, свободно владеющий теми отделами высшей математики, с которыми приходилось до сих пор встречаться в теоретической физике. Эти отделы ему не помогут; он должен сперва изучить еще такой отдел, о существовании которого он, почти наверное, даже не слыхал.

Ясно, что и мы, в этой книжечке, не можем следить за той творческой научной работой, которая привела к созданию нового научного здания. Мы *должны ограничиться*, кроме указания фундамента, *простым описанием уже готового здания*, иначе говоря, *перечнем окончательных результатов и выводов*.

Эти результаты мы должны принять на веру, обосновывая, однако, где это возможно, их правдоподобность или даже достоверность. С особой подробностью мы должны остановиться на *проверках* выводов путем наблюдений или опытов, где такие проверки оказались возможными.

Итак, вот чем мы должны ограничиться: фундамент и окончательные выводы. О фундаменте мы говорили, теперь мы должны пропустить весь ход десятилетней работы постройки нового научного здания, ибо эта работа безусловно недоступна популярному изложению. Как бы перескочив через нее, мы обращаемся к изложению тех выводов, к которым приходит общий принцип относительности

§ 18. Важнейшие выводы общего принципа относительности. Нет сомнения, что в мире существует огромное число больших тел, которые составляют совокупность всех видимых и невидимых звезд с их спутниками, туманных пятен и т. д. Мы их назвали мировыми или космическими массами, а иногда мы их же обозначали, как «отдаленные» массы. Они все движутся в различных направлениях, так что непрерывно меняется их относительное расположение. Действие этих космических масс, в состав которых входит вся существующая материя, проявляется во всех, без исключения, местах мирового пространства, они повсюду вызывают то, что мы далее будем называть гравитационным полем. Мы, пока, не соединяем с этим термином определенных представлений о свойствах такого поля; мы желаем только выразить, что эти свойства вызываются совокупностью отдаленных космических масс и их распределением относительно того места, где находится рассматриваемое поле. Вот, от этого-то поля зависит внутренняя структура пространства в данном месте, а затем уже, в тесной связи с этой структурой, зависят и вообще физические явления, происходящие в этом же месте пространства. Итак, структура пространства создается отдаленными, космическими массами, а в чем эта структура заключается, будет ясно из ниже изложенного.

Приступим теперь к обзору важнейших выводов общей теории относительности. Таких выводов мы рассмотрим пять; в них рисуется новая картина мира, или, иначе, новое миропонимание.

1. Мировое пространство не бесконечно и не конечно в обыденном, буквальном смысле слова. Оно замкнуто в самом себе, обладая в каждой точке определенной внутренней кривизной. Оно, в трех измерениях, аналогично окружности и шаровой поверхности, у которых, соответственно, одно и два измерения. Кривизна не везде одинаковая, так что аналогия с шаровой поверхностью, во всяком случае, неполная. Вдали от больших тел кривизна весьма мала и везде, более, или менее, одинакова. Но вблизи больших масс, напр., недалеко от Солнца, кривизна уже другая; она больше, чем вдали от масс. Земля, сравнительно, слишком малое тело, и внутренняя кривизна пространства вблизи ее поверхности незаметно мало отличается от кривизны в свободном, междузвездном пространстве.

На вопрос о бесконечности или конечности пространства мы теперь имеем ясный ответ: мировое пространство конечно, но не в прежде указанном, обыденном, буквальном смысле слова; оно конечно, наподобие того, как окружность и шаровая поверхность, или

вообще любая замкнутая линия и замкнутая поверхность должны быть названы конечными.

II. То, что мы называем инерцией, не должно быть объяснено каким-то стремлением, сопротивлением и т. под., которые якобы обнаруживают мертвые тела при определенных условиях. Инерция вызывается совокупностью космических масс и зависит исключительно только от покоя или движения тел относительно этих далеких масс. Это относится и к центробежной силе, которая также вызывается космическими массами, относительно которых данное тело вращается, а не каким-то несуществующим абсолютным вращением в абсолютном пространстве; те же далекие массы вызывают сплющивание жидкого, вращающегося шара.

III. Эвклидово пространство не обладает внутренней кривизной; оно бесконечно. Но наше пространство не бесконечно; оно замкнуто в самом себе и имеет внутреннюю кривизну. Подобно тому, как поверхность шара не есть плоскость и имеет свою геометрию, так и наше пространство не эвклидово и имеет свою геометрию, отличную от геометрии Эвклида. Но отступления весьма малы, и Гаусс не мог их заметить, измеряя углы сравнительно небольшого треугольника на поверхности Земли. На стр. 56—57 уже было сказано, что он заметил бы отступление суммы углов от двух прямых, если бы он мог измерить углы треугольника, в вершинах которого находились бы Солнце и две весьма отдаленные от него и друг от друга звезды.

Геометрия на шаровой поверхности зависит от степени ее кривизны. Чем меньше радиус шаровой поверхности, тем больше ее кривизна и тем сильнее отступает ее геометрия от эвклидовой геометрии на плоскости, напр., тем более отличается сумма углов треугольника от двух прямых при заданных длинах сторон треугольника. О замкнутой не-шаровой поверхности (эллипсоид, поверхность яйца) можно сказать, что геометрия в различных ее участках различная. Аналогично, и в нашем пространстве геометрия, в данном месте, зависит от внутренней кривизны в этом месте, а так как эта кривизна не везде одинаковая, то и геометрия нашего пространства не во всех ее участках одинаковая. Вблизи очень больших масс кривизна пространства больше, чем далеко от всяких масс; поэтому и геометрия вблизи больших масс, напр., не очень далеко от поверхности Солнца, более отступает от геометрии Эвклида, чем в свободном междузвездном пространстве или чем на поверхности Земли.

Выше было сказано, что свойства пространства в данном месте определяются тем гравитационным полем, которое существует в этом месте, а само поле вызывается совокупностью отдаленных космиче-

ских масс. Но к свойствам пространства относитея, прежде всего, его внутренняя кривизна, от которой затем уже зависит геометрия, господствующая в рассматриваемом месте, а след. и ее отступления от геометрии Эвклида Связывая все сказанное, мы получаем такую картину. отдаленные космические массы создают структуру пространства в каждом месте, а след. они же создают и геометрию каждого участка пространства.

И вот, перед нами выростает совершенно новая, грандиозная мысль. **Геометрия есть часть физики!** До Эйнштейна, геометрия представлялась самодовлеющей наукой, которую можно было считать за часть математики, с другими частями которой она, во всяком случае, назалась тесно связанной. Физика, вообще широко пользующаяся математикой, не могла обойтись и без геометрии. А теперь оказалось, что сама геометрия представляет отдел физики, ибо напр., сумма углов треугольника зависит от тех чисто физических условий, при которых находится этот треугольник, т.-е. от той части пространства, в которой он расположен. Эти физические условия определяются и создаются совокупностью отдаленных космических масс. От них зависит гравитационное поле, структура пространства, так или иначе отражающаяся на физических явлениях, происходящих в данном месте, и от них же зависит геометрия в этом месте. При другом распределении космических масс мы нашли бы детали физических явлений несколько измененными, и то же самое относилось бы к геометрии. Ясно, что завися от физических условий, геометрия должна быть рассматриваема, как часть физики. Эта мысль всецело принадлежит Эйнштейну, она выросла из того фундамента, на котором этот мыслитель построил общую теорию относительности.

О не-эвклидовой геометрии нашего пространства мы здесь распространяться не можем, и только на одном из сюда относящихся вопросов мы несколько остановимся. Мы неоднократно говорили о сумме углов треугольника, три стороны которого суть прямые линии, не вдаваясь ни в какие более точные определения, считая понятия о прямой линии и о треугольнике известными из элементарной геометрии, или даже из повседневной жизни. Однако, допущение пространства, замкнутого в самом себе, обладающего внутренней кривизной, и вытекающая отсюда необходимость признать это пространство не-эвклидовым, имеющим свою геометрию, отличающуюся от геометрии Эвклида, пошатнули основные представления привычной для нас геометрии и заставляют нас пересмотреть основы этой науки.

Мы, как и раньше, будем называть треугольником такую геометрическую фигуру, которая получается, если мы соединим три

точки теми линиями, которые мы в новой, возникающей перед нами геометрии нашего не-эвклидова пространства могли бы назвать прямыми линиями, или, выражаясь точнее. которые в нем становятся на место прямой линии геометрии Эвклида. Таким образом, перед нами возникает вопрос *что такое прямая линия?* или, точнее, *какая линия заменяет в мировом пространстве прямую линию геометрии Эвклида?* Обычно прямой линии дается краткое определение прямая линия *есть* кратчайшее растояние между двумя точками. Это определение не отличается ясностью, оно и логического анализа не выдерживает, ибо неизвестно, что значит «расстояние между двумя точками»; очевидно, нельзя же ответить: это — длина прямой, соединяющей данные две точки! Хотя много длиннее, но зато ясным и не вызывающим сомнений, будет такое определение: *из всех линий, соединяющих две точки прямая имеет наименьшую длину.* А затем уже можно добавить, что ее длина называется «расстоянием» двух данных точек друг от друга. Кроме указанного определения понятия о прямой линии, могут быть даны еще следующие два:

a) Прямая линия — это та линия, по которой движется тело, предоставленное самому себе;

b) Прямая линия — эта та линия, по которой распространяется световой луч.

Мы остановимся на *первом* из приведенных трех определений прямой линии; оно, очевидно, относится только к эвклидовой геометрии, ибо на шаровой поверхности кратчайшая линия, соединяющая две точки, есть дуга окружности, плоскость которой проходит через центр шара. Если на произвольной поверхности (эллипсоида, яйца, *седла*) взять две точки, то между ними можно провести бесчисленное множество линий, расположенных на самой поверхности. Одна из этих линий обладает наименьшею длиной. Такая линия называется *геодезической*. Та линия, которую мы обычно называем прямой, есть частный случай геодезической линии, а именно, она геодезическая линия на эвклидовой плоскости и в эвклидовом пространстве. Геодезическая линия на шаровой поверхности есть дуга большого круга. Вид геодезической линии на произвольной поверхности определяется методами высшей математики.

Если в не-эвклидовом пространстве взять две точки, то между ними можно провести бесчисленное множество различных линий. Между ними одна будет обладать наименьшею длиною; это и будет *геодезическая линия* не-эвклидова пространства, каковым оказывается и наше мировое пространство. Через каждую точку этого про-

странства можно провести во всех направлениях геодезические линии, заменяющие собою те прямые линии, которые можно провести по всевозможным направлениям из любой точки эвклидова пространства, которое бесконечно и внутренней кривизной не обладает. С некоторой натяжкой можно сказать, что геодезические линии нашего пространства, даже на больших протяжениях, не отличаются от прямых линий; но на это можно возразить, что прямых линий эвклидовой геометрии вообще не существует, так как мы не знаем эвклидова пространства. Те линии, которые мы в обыденной жизни называем прямыми, суть отрезки геодезических линий нашего пространства. Впрочем, можно условиться называть геодезические линии мирового пространства прямыми, но тогда следует помнить, что если рассматривать колоссальные протяжения, то геодезические линии обнаружат такие свойства, которые не согласуются с привычными нам свойствами прямых линий.

К таким свойствам геодезических линий мирового пространства относится и следующее. Если бы внутренняя структура этого пространства, а след. и его кривизна, были везде одинаковые, то геодезические линии были бы замкнуты, т.-е. геодезическая линия, выходящая в какомлибо направлении из данной точки, возвращается к этой точке, пройдя мировое пространство, подобно тому, как геодезическая линия на шаровой поверхности, т.-е. окружность, центр которой в центре шара, также замкнута, т. е возвращается к той точке, от которой она проведена Однако, внутренняя кривизна нашего пространства не везде одинаковая (см. выше), а потому и геодезические линии могут быть не замкнуты; это значит, что пройдя мировое пространство, такая линия не попадает вновь в исходную точку, но проходит на некотором расстоянии мимо нее. Но если принять во внимание, что в междузвездном пространстве кривизна вероятно везде одна и та же и лишь вблизи больших масс заметно меняется, то нельзя отрицать возможности возвращения к исходной точке, если и не всех, то все же многих из геодезических линий, вышедших из этой точки по всевозможным направлениям.

К геодезическим линиям отчасти подходят и те определения, которые мы привели на стр. 77 и которые относятся к прямой линии в пространстве Эвклида. Таким образом мы можем сказать:

a) Геодезическая линия — это та линия, по которой движется тело, предоставленное самому себе,

b) Геодезическая линия находится в тесной связи с линией, по которой распространяется световой луч.

Таким образом, мы получили более подробное разъяснение того; что на стр. 60 было сказано о возвращении световых лучей к их

исходной точке. Ниже будут выведены некоторые, вытекающие отсюда, дальнейшие следствия.

Те геометрические фигуры, которые в эвклидовой геометрии называются прямолинейными, потому что они образованы из прямых линий, состоят в геометрии мирового пространства из геодезических линий. сюда относится и *треугольник*. Положим, что три наблюдателя находятся, по одному, на трех, весьма друг от друга удаленных звездах, и что каждый из них измеряет тот угол треугольника, образованного тремя звездами, в вершине которого он сам находится. Для этого он пользуется зрительной трубой, которую он сперва направляет на одну, потом на другую звезду; прибор дает возможность определить угол поворота трубы, и это и есть искомый угол треугольника. Другие наблюдатели измеряют аналогичным способом два других угла треугольника. Но спрашивается, какие же углы измеряют три наблюдателя? Каждый из них устанавливает ось трубы по направлению, в котором он *видит* данную звезду, т.-е. в том направлении, которое имеют доходящие до него световые лучи; его можно принять за направление геодезической линии, которая соединяет его со звездой. Отсюда ясно, что каждый из наблюдателей измеряет угол между двумя встречающимися геодезическими линиями, исходящими из двух звезд, т.-е. из двух других вершин треугольника. Сумма измеренных таким образом углов будет *заметно* отличаться от двух прямых, если расстояния трех звезд друг от друга будут выбраны достаточно большими. Здесь под «*расстоянием*» следует понимать длину соответствующей геодезической линии.

IV. *Геометрические размеры* тела зависят от свойств, т.-е. от структуры того участка мирового пространства, в котором это тело находится. В таких участках, в которых эта структура неодинаковая в различных направлениях, размеры тела зависят от положения тела. Такой случай мы имеем близ поверхности весьма больших тел, напр., Солнца. Если на поверхности Солнца установить стержень вертикально, т.-е. перпендикулярно к поверхности Солнца, то длина стержня окажется меньше длины того же стержня, расположенного горизонтально; в последнем случае его длина равна той, которая получается при ее измерении, когда ось стержня имеет произвольное направление, но в участке пространства, далеком от больших тел. Все это находится в теснейшей связи с той неэвклидовой геометрией, которая господствует на поверхности Солнца, но выяснить эту связь мы здесь не можем.

V. Отдаленные космические массы, создающие структуру, а вместе с нею и геометрию во всех участках пространства, определяют также

и быстроту течения времени. Вблизи больших масс время течет медленнее, чем вдали от них, на Солнце время течет медленнее, чем на Земле. Это надо так понимать. Положим, что на земной поверхности происходит определенное физическое явление при точном задании всех условий, т.-е тех величин, от которых зависит течение данного явления. К таким величинам могут, напр, относиться температура, давление, действующие силы, состав и массы тел, участвующих в этом явлении, устройство прибора, в котором оно происходит и т. д Простой пример представляют пружинные часы какого-либо устройства, под «явлением» мы будем подразумевать вращение секундной стрелки на один полный оборот, продолжительность этого явления равна одной минуте. Теперь представим себе, что совершенно такие же часы находятся на Солнце и что каким-нибудь образом удалось создать для них условия, во всех отношениях одинаковые с теми, при которых находятся часы на земной поверхности, т. е., напр., одинаковые температуры, давление и даже состав окружающего газа и т. д; единственным отличием остается, что на Солнце гравитационное поле, а след. и структура (кривизна) пространства иные, чем на Земле. Тогда окажется, что секундная стрелка на Солнце вращается медленнее, чем на Земле. Это значит, что если бы наблюдатель на Земле мог видеть часы, находящиеся на Солнце, то он заметил бы, что эти часы отстают от тех, которые находятся рядом с ним на Земле. Мы подойдем ближе к одному вопросу, который мы рассмотрим ниже (смещение спектральных линий), если мы предположим, что часы соединены с таким механизмом, который испускает световой сигнал каждый раз, когда секундная стрелка оканчивает полный круг. Наблюдатель на Земле воспринимает от своих часов явление периодического характера, а именно — световые сигналы, правильно повторяющиеся через равные промежутки времени. Такой промежуток времени мы назовем периодом наблюдаемого явления; в данном случае он равен одной минуте. Часы на Солнце соединены с таким же механизмом, так что и от них исходят периодические световые сигналы, которые доходят до Земли. Мы, конечно, можем допустить, что наблюдатель на Земле видит эти сигналы и может, на своих часах, определить их период , т.-е. время от одного сигнала до другого. Он найдет, что этот период больше одной минуты, что сигналы, идущие от Солнца, медленнее следуют один за другим, чем сигналы, испускаемые на Земле. Мы еще раз подчеркиваем, что условия, при которых часы находятся на Земле и на Солнце, предполагаются совершенно тождественными, за единственным исключением: структура, т.-е. внутренняя кривизна, пространства на Солнце иная, чем на Земле.

Мы в пяти пунктах рассмотрели те главнейшие результаты, к которым приводит общий принцип относительности. Их совокупность дает нам новую картину мира, новое миропонимание, существенно отличающееся от старого, неясного, необоснованного, оставлявшего без ответа самые основные вопросы.

§ 19. Концентрация лучей; фантомы. Все лучи, исходящие одновременно от светящегося тела во все стороны, должны, теоретически, пройдя всю вселенную, возвратиться к тому месту, от которого они вышли. В действительности это может произойти только в том случае, если во всех участках пространства, пройденного лучем, внутренняя кривизна пространства одна и та же, а для этого необходимо, чтобы луч не проходил вблизи поверхности большого тела, т.-е. какой-либо звезды; вторым является, конечно, условие, чтобы луч не потух на своем длинном пути через мировое пространство, чтобы он не был поглощен космическою пылью, которая, вероятно, носится по мировому пространству.

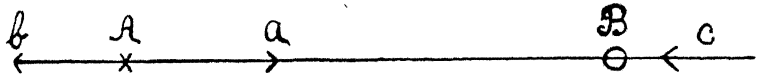
Оставим совершенно в стороне вопрос о возможности соблюдения указанных двух условий. Допустим, что лучи, или хотя бы часть их, действительно возвращаются к исходной точке, и посмотрим, к каким это должно привести результатам, какие должны обнаружиться новые явления. Положим, что какая-либо звезда занимает, в данный момент, некоторое определенное положение в пространстве; допустим, что лучи, от нее исходящие, не потухая, проходят мировое пространство и возвращаются к тому месту, из которого они вышли. В настоящее время уже можно прикинуть, сколько времени требуется, чтобы луч прошел весь свой замкнутый путь; заметим, что в одну секунду луч проходит триста тысяч километров. Легко понять, что искомая длина всего замкнутого пути зависит от степени внутренней кривизны пространства; она тем больше, чем меньше эта кривизна. Если бы кривизна равнялась нулю, то пространство было бы эвклидово, т.-е. бесконечно. Аналогично, на поверхности шара геодезические замкнутые линии (большие окружности) тем длиннее, чем меньше кривизна шаровой поверхности, т.-е. чем больше ее радиус; мы уже видели, что путь светового луча в мировом пространстве также замкнут.

Теория, данная Эйнштейном, показывает далее, что внутренняя кривизна мирового пространства может быть вычислена, если известна средняя плотность материи в этом пространстве. Выясним смысл этого термина. Плотность какого-либо твердого, жидкого или газообразного вещества определяется тою массою, которая содержится

в единице объема этого вещества, напр., числом граммов, которые находятся в одном кубическом сантиметре; при таком определении, плотность воды будет равна единице. Материя распределена в мировом пространстве весьма неравномерно; она скучена в определенных местах, образуя отдельные, вероятно бо́льшею частью шаровидные массы, либо светящиеся, как солнце и звезды, либо темные, как планеты и иные космические тела. В частях пространства, занятых этими телами, плотность материи, вообще, не малая. Но во всем междузвездном пространстве плотность материи должна считаться равною нулю, если не принимать во внимание возможного присутствия в нем космической пыли. Теперь вообразим себе, что все существующие в мировом пространстве тела разделены на мельчайшие частицы, пожалуй, даже, на атомы, и что вся содержащаяся в них материя распределена совершенно равномерно по всему пространству, которое, таким образом, окажется вполне заполненным материей в виде чрезвычайно тонкого тумана. Плотность этого тумана и представит ту величину, которую мы назвали «средней плотностью» материи в мировом пространстве. Легко понять, что она должна быть величиной невообразимо малой, если ее измерять, как выше, числом граммов материи, содержащихся в одном кубическом сантиметре. Вычислить эту величину сколько-нибудь точно невозможно, так как нам слишком мало известно о массах различных звезд и об их распределении в пространстве. Тем не менее, астроном Де-Ситтер (De-Sitter) сделал попытку, как мы выразились — «прикинуть», как велика может быть эта средняя плотность. Основываясь на некоторых астрономических данных, он нашел для средней плотности величину, которую можно написать в виде дроби, числитель которой равен единице, а знаменатель равен единице с 26-ю нулями $\left(\frac{1}{10^{26}}\right)$. Вообразим себе часть пространства в виде куба, каждое ребро которого имеет длину, равную одной тысяче километров. В объеме этого куба будет находиться одна сотая доля грамма материи, или один грамм в объеме ста таких кубов, т. е. в объеме ста тысяч миллионов кубических километров. На объем ста пятидесяти кубических сантиметров приходится масса, равная массе одного атома водорода. Конечно, за все эти числа ручаться нельзя, но они все же дают некоторое понятие о тех величинах, которые соответствуют действительности.

Зная среднюю плотность материи в мировом пространстве, можно, по формулам Эйнштейна, вычислить внутреннюю кривизну этого пространства, а затем и всю длину замкнутой геодезической линии, или, что почти то же самое, длину всего пути светового луча от места его возникновения до возвращения к тому же месту. Зная, что свет

проходит в одну секунду триста тысяч километров, можно легко вычислить, сколько времени лучу надо, чтобы пройти весь замкнутый путь через все мировое пространство. Оно равно пятистам миллионам лет. Само собой разумеется, что и это число может, в ту или другую сторону, довольно значительно уклоняться от действительности; но все же оно дает некоторое понятие о тех величинах, которые характеризуют размеры конечного мирового пространства. Время, равное пятистам миллионам лет, обыкновенно поражает своею громадностью. Однако, когда пишущий эти строки впервые познакомился с результатами вычислений Де-Ситтера, он был удивлен его малостью. Ведь следует иметь в виду, что это число характеризует то пространство, которое, благодаря новому миропониманию, заменяет собой старое, бесконечное эвклидово пространство, в котором луч должен вечно распространяться, никогда не возвращаясь к своей исходной точке. Наше мировое пространство не есть пространство Эвклида; оно не бесконечно велико, но, во всяком случае, оно очень велико, и число 500 миллионов лет не должно поражать своей величиной, если вспомнить, что свету нужны сотни тысяч лет, чтобы дойти до нас от ясно наблюдаемых нами туманных пятен. Примем указанное число и допустим, что лучи света действительно могут пройти по всему замкнутому мировому пути и укажем, какие курьезные явления должны в этом случае происходить и наблюдаться.



Черт. 4.

Положим, что в точке B (черт. 4) находится Земля, а где-то далеко от нее, в точке A, имеется звезда, лучи которой доходят до Земли, идя по направлению стрелки a. Наблюдатель на Земле видит звезду в A; точнее говоря, он видит ее там, где она находилась, когда она испускала лучи, доходящие до него. Но звезда A испускает лучи по всем направлениям, и некоторые из этих лучей могут достигнуть Земли B после того, как они прошли через все мировое пространство. На черт. 4 схематически показано направление испускания этих лучей стрелкой b, а направление, в котором они встречают Землю, стрелкой c. Наблюдатель увидит звезду в направлении, обратном направлению стрелки c (на черт. 4 направо). Таким образом два наблюдателя видят одну и ту же звезду в двух противоположных направлениях. Однако, последнее неточно, так как мы не обратили внимания на следующее обстоятельство. Лучи, идущие к B по направлению стрелки a, вышли от звезды A

сравнительно не очень давно; но лучи, идущие по направлению стрелки *c*, покинули звезду сотни миллионов лет тому назад, когда звезда находилась в совершенно другом месте мирового пространства, а потому они доходят до *B*, имея иное направление, чем показано на черт. 4. Но это не существенно; важно то, что два наблюдателя, находящиеся на Земле, одновременно видят одну и ту же звезду в двух совершенно различных местах небесного свода. Возможно даже, что один и тот же наблюдатель видит одну и ту же звезду, в двух местах открытого перед ним небесного свода!

Другое, не менее курьезное явление, заключается в следующем. Положим, что в некотором месте мирового пространства находится звезда, испускающая лучи по всем направлениям. Через 500 миллионов лет эти лучи вновь сходятся в том же месте, в котором самой звезды уже нет, так как она за это долгое время успела перейти в совершенно другую часть мирового пространства. Если световые лучи сходятся в одном месте, то это место, как известно, называется фокусом. Двояковыпуклое стекло (чечевица), а также вогнутое зеркало дают пучки лучей, сходящихся в соответствующем фокусе, от которого они, распространяясь дальше, вновь расходятся. Если такие, вновь расходящиеся лучи попадают в глаза наблюдателя, то последний видит в фокусе такую же светящуюся точку, как если бы на месте фокуса находился действительный источник световых лучей. И в нашем случае мы можем назвать фокусом то место, в котором со всех сторон собираются лучи, когда-то вышедшие из того же места. Собравшись в фокусе, лучи идут дальше, т.-е. вновь расходятся по всем направлениям. Если они теперь достигнут наблюдателя, находящегося на Земле, то этот наблюдатель увидит звезду в том месте, в котором образовался фокус и в котором нет никакой звезды, но 500 миллионов лет тому назад находилась звезда.

Английский астроном Эдингтон (Eddington) называет такие фиктивные звезды фантомами и ему представляется весьма забавной мысль, что, может быть, многие из звезд, которые мы наблюдаем на небесном своде, вовсе не звезды, а лишь фантомы тех звезд, которые сотни миллионов лет тому назад находились в тех самых местах, где ныне образовались фокусы их лучей и откуда вновь расходятся световые лучи во все стороны. Эддингтон высказывает даже мысль, что лучи могут, разойдясь от фокуса, второй, третий и т. д. раз пройти вселенную и, таким образом, во второй, третий и т. д. раз образовать светящиеся фокусы, которые должны нам казаться звездами, так, напр., мы могли бы наблюдать целый ряд звезд, которые суть фантомы нашего Солнца, указывающие те места, где оно находилось 500, 1000, 1500 и т. д.

миллионов лет тому назад. А между спиральными туманностями, которые мы наблюдаем на небесном своде, могут быть такие, которые суть не что иное, как фантомы нашей звездной системы с ее млечным путем. Но, конечно, следует помнить, что самое возникновение фантомов представляется, хотя теоретически вполне возможным, но фактически все же мало вероятным по двум причинам, на которые уже указано: отклонение лучей при прохождении их недалеко от больших масс и поглощение лучей космическою пылью.

§ 20. Проверка результатов теории относительности. Движение планеты Меркурий. В § 18 были рассмотрены важнейшие выводы общей теории относительности. У читателя не мог не возникнуть вопрос: не представляют ли все эти выводы, а вместе с ним и то новое миропонимание, которое на них построено, чистейшую фантазию? Достаточно ли прочен и не вызывает ли сомнения тот фундамент, на котором Эйнштейн построил новое научное здание? Такие мысли не могли возникнуть по отношению к специальному принципу относительности, ибо там мы имели фундамент крепкий, надежный и не вызывавший сомнений. Мы видели, что фундаментом служили опыты Майкельсона и других ученых; они давали нам *факты*, реальность которых незыблемо установлена. Оставалось только логически вывести из них все те следствия, к которым они приводят, что и было сделано Эйнштейном в 1905 году.

Существенно другую картину представляет нам история возникновения общей теории относительности, фундамент которого состоит, как мы видели, из двух частей. Одна из этих частей также связана с *опытно* установленным фактом, а именно с фактом равенства весомой и инертной масс различных тел (опыты Этвеша) или, что то же самое, одинаково быстрого падения всех тел в пустоте. Вторую часть фундамента общей теории относительности составляет та *предвзятая* мысль Эйнштейна, которая и выражается тем, что мы назвали общим *принципом* относительности; мы эту мысль рассмотрели и формулировали в § 14. Далее, мы в § 16 познакомились с принципом эквивалентности, который, хотя и является прямым следствием равенства масс весомой и инертной, в то же время тесно связан со второю частью фундамента, т.-е. с общим принципом относительности, как было выяснено в конце параграфа 16-го. Это показало нам, что две части фундамента нового учения не только не противоречат друг другу, но что одна из них, равенство весомой и инертной масс, может быть рассматриваема, как необходимое следствие другой, т.-е. предвзятой мысли, выраженной об-

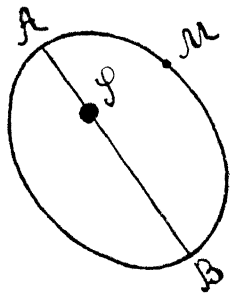
щим принципом относительности. Но не наоборот! Из равенства масс весомой и инертной нельзя логически заключить, что общий принцип относительности должен быть верен. Такое заключение представлялось бы столь же смелым и почти столь же мало обоснованным, как и простая, ни на что не опирающаяся формулировка общего принципа в виде постулата, в виде предвзятой мысли. Мы видим, что две части фундамента нового учения нельзя назвать равноценными. Первая часть, несомненно, играет видную роль в учении Эйнштейна, но главная основа этого учения все-таки заключается в том постулате, который называется общим принципом относительности.

Из сказанного явствует, что читатель действительно имеет право поставить вопрос о степени обоснованности выводов общей теории относительности, а след. и о степени доверия, которого эти выводы заслуживают. Заставить нас признать новую картину мира, очевидно, могут только такие доводы, которые логически построены на основе, не могущей вызывать сомнения, напр., на основе твердо установленного результата экспериментальных исследований. Но, вместо таковых, мы видим предвзятую мысль, не являющуюся следствием чего-либо ранее установленного, мы видим постулат, степень приемлемости которого может различным лицам представляться весьма неодинаковой. Но, если исходная мысль неверна, если наш мир не так устроен, как утверждает постулат, то все вытекающие из нее выводы должны оказаться фантазиями и гордое научное здание, смело построенное на слишком зыбкой почве, должно рухнуть.

Тут-то и начинается та громкая слава Эйнштейна, которая сделала его имя известным далеко за пределами круга специалистов-ученых, и вот в чем заключается источник этой славы. Если картина мира, которая вырисовывается в учении Эйнштейна, верна, то мы вправе ожидать, что с нею окажутся связанными такие явления, которые до того не были известны и реальность которых может быть проверена путем опытов или наблюдений. Возможен и такой случай: существует какое-либо явление, хорошо изученное, так что в его реальности не может быть сомнения; но это явление не могло быть объяснено, оно представляло загадку, новая же теория дает полное его объяснение, как с качественной, так и с количественной стороны. Так и случилось; учение Эйнштейна, построенное на его принципе относительности, объяснило одно давно известное, загадочное явление и предсказало два совершенно новых.

Рассмотрим сперва первое, казавшееся до появления учения Эйнштейна необъяснимым. Оно относится к движению Меркурия, ближайшей к Солнцу из известных нам планет.

Меркурий движется, как и все планеты, вокруг Солнца по эллипсу. На черт. 5-ом точка S изображает Солнце, точка *M*—Меркурий, путь (или орбита) которого вокруг Солнца для ясности изображен более растянутым, чем каким он оказывается в действительности. Точка *A*, наиболее близкая к Солнцу, называется перигелием орбиты, прямая *AB*—большою осью эллиптической орбиты.



Черт. 5

На основании точнейших астрономичесиих наблюдений было давно известно, что большая ось *AB* орбиты Меркурия медленно вращается, не переставая, конечно, проходить через Солнце: можно сказать, что весь эллипс вращается вокруг Солнца S. Направление этого вращения совпадает с направлением вращения планеты вокруг Солнца. Если при одном из оборотов Меркурия перигелий находился в точке A, то при следующем обороте перигелий будет несколько сдвинут в сторону и то же самое повторится при каждом обороте. Такое вращение большой полуоси эллиптической орбиты планеты, представляет явление, давно известное астрономам и объясненное влиянием других планет на ту, которая рассматривается. Астрономы могут вычислить, насколько полуось должна повернуться в заданное время, напр., в течение ста лет под влиянием других планет, и наблюдения вполне подверждали правильность вычислений; величина наблюденного вращения оказывалась равной величине вычисленной. Исключением оказался Меркурій; наблюдения обнаружили, что вращение большой оси его орбиты происходит быстрее, чем должно бы быть, если бы это вращение вызывалось только влиянием других планет. Великий французский астроном Леверье (Le Verrier), тот самый, который путем вычислений открыл планету Нептун, нашел, что влияние всех остальных планет на Меркурий должно вызвать вращение большой оси его орбиты, равное 532″ (угловые секунды) в сто лет, между тем как наблюдения давали вращение в 574″ в сто лет. Таким образом оставалось необъясненным вращение в 42 угловые секунды в сто лет, причем возможная ошибочность этого числа не могла превышать одной или двух секунд. Были предложены гипотезы для объяснения этого, так сказать, добавочного вращения. Предполагалось, напр., что между Меркурием и Солнцем находится еще одна неизвестная планета, и ей даже дали название «Вулкан». Однако, эта планета найдена не была, хотя ее легко можно было бы заметить при ее, вероятно, весьма частых прохождениях через диск Солнца. Многие астрономы полагают, что густое кольцо космической

пыли окружает Солнце приблизительно в плоскости, около которой расположены орбиты планет (зодиак) и что это кольцо и вызывает ту светлую полосу, которая в тропических странах наблюдается в западной части горизонта после заката Солнца и которая известна под названием зодиакального света. Влиянием этого кольца на Меркурий старались объяснить загадочный наблюдаемый избыток вращения орбиты этой планеты. Но и это объяснение не дало вполне удовлетворительных результатов, не говоря уже о том, что самое существование пыльного кольца, окружающего Солнце, представляется, пока, гипотезой.

Эйнштейн, исходя из самых общих формул своей теории, исследовал задачу о движении одной отдельной планеты вокруг Солнца; влияние других планет приэтом отпадает. Закон всемирного тяготения Ньютона приводит к результату, что планета должна двигаться по эллиптической орбите и притом по тем законам, которые еще до Ньютона были установлены Кеплером. Таково должно быть движение планеты в эвклидовом пространстве. Но планеты, в действительности, движутся в не-эвклидовом пространстве, геометрия которого отличается от геометрии Эвклида, хотя и весьма мало. Вычисления Эйнштейна и других ученых показали, что общие формулы теории относительности приводят к следующим результатам. Закон тяготения Ньютона должен быть несколько изменен, вследствие чего движение планет происходит по *незамкнутым* орбитам. Это значит, что планета, обойдя вокруг Солнца, не возвращается к той точке, в которой она раньше находилась. Движение происходит так, как будто *вся орбита медленно вращалась*; перигелий смещается и достигается вновь планетой несколько *позже*, чем после одного полного оборота вокруг Солнца. Угол поворота орбиты зависит от расстояния планеты от Солнца и от степени растянутости эллипса, т.-е. от той величины, которая называется эксцентриситетом эллипса. При одинаковой степени растянутости, угол поворота орбиты обратно пропорционален расстоянию планеты от Солнца. Это значит, что если из двух планет первая в три раза дальше от Солнца, чем вторая, то при каждом обороте первой вращение будет в три раза меньше, чем при каждом обороте второй. К этому следует прибавить, что время одного оборота для первой планеты приблизительно в пять раз больше, чем для второй. Отсюда следует, что скорость вращения всей орбиты для первой планеты приблизительно в 15 раз меньше, чем для второй; таково отношение величин вращения в одинаковые времена, напр., в течение ста лет. Приближенно можно сказать, что вращение орбиты за время *одного* обращения планеты вокруг Солнца пропорционально квадрату скорости движения планеты. При *данном* расстоянии от Солнца, вращение орбиты

тем больше, чем более эта орбита растянута, т.-е. чем больше ее эксцентриситет. Однако, эта последняя зависимость не резко выражена и не играет большой роли, так как орбиты планет, вообще, очень мало растянуты, т.-е. мало отличаются от окружностей. Но в другом отношении степень растянутости орбиты играет важную роль в разбираемом здесь вопросе. Чтобы проверить теорию, необходимо сравнить ее выводы с результатами непосредственных наблюдений, а поэтому наблюдения должно быть не только возможны, но и обладать достаточною степенью точности. Вращение всей орбиты планеты может быть измерено, если определить смещение перигелия, т.-е. той точки орбиты, которая наиболее близка к Солнцу. Но легко понять, что положение этой точки не может быть определено с достаточной точностью, если орбита очень мало отличается от окружности; а раз само положение точки плохо установлено, то о точном определении ее перемещения не может быть и речи. Это относится, напр., к Венере, орбита которой чрезвычайно мало отличается от окружности.

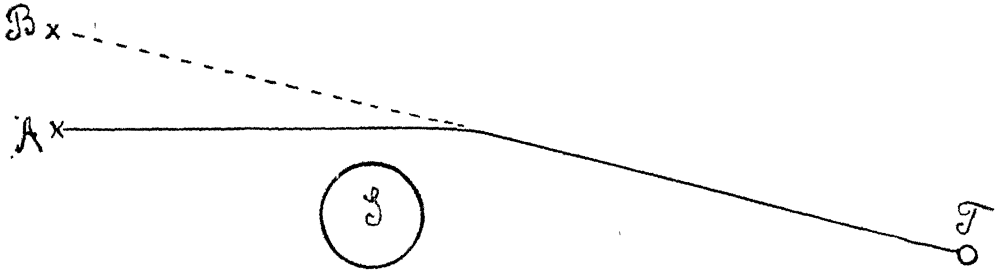
Из всего сказанного следует, что проверка тех выводов теории Эйнштейна, которые относятся к движению планеты вокруг Солнца, может быть произведена только в том случае, когда планета находится возможно ближе к Солнцу и когда ее орбита обладает большою степенью растянутости, т.-е. значительно отличается от орбиты круговой. Обоим этим условиям как раз удовлетворяет орбита Меркурия. Эта орбита особенно близка к Солнцу, а потому ее вращение должно быть, сравнительно, быстрое. В то же время и растянутость орбиты, опять-таки сравнительно, весьма значительная. Последнее обстоятельство дало астрономам возможность достаточно точно не только определить положение перигелия орбиты Меркурия, но и величину его вращения. Выше было указано, что Леверье вычислил на основании наблюдений, что перигелий орбиты Меркурия вращается в сто лет на 574″ (угловые секунды), между тем как все остальные планеты могут вызвать вращение только в 532″, так что остается еще вращение, равное 42″ в сто лет, остававшееся без объяснения; возможная ошибка может составлять 2″.

Формула Эйнштейна (1915 г.) показывает, что внутренняя кривизна пространства, его отступление от пространства Эвклида должно вызвать вращение орбиты Меркурия на 43″ в сто лет, т. е. как раз такое, какое дают наблюдения. Таким образом общая теория относительности дала полное объяснение явления, которое до того казалось загадкой. Добавим, что и направление вращения было правильно предсказано теорией Эйнштейна. Это качественно и количе-

ственно правильное предсказание произвело огромное впечатление на ученых и впервые заставило широкие их круги обратить должное внимание на новое учение, основанное на общем принципе относительности *).

Для Венеры, как сказано, нет возможности из наблюдений определить сколько-нибудь точную величину вращения орбиты. Для Земли теория Эйнштейна дает вращение в 4″ в сто лет. Наблюдение дает числа, колеблющиеся в широких пределах; их среднее значение около 6″. Для Марса теория предсказывает вращение всего только в 1″ в сто лет; это слишком малая величина, чтобы она могла быть проверена наблюдениями.

§ 21. Отклонение световых лучей Солнцем. Нам уже приходилось говорить о том, что, по теории Эйнштейна, луч света, исходящий от далекой звезды A (черт. 6; он сделан не вполне пра-



Черт. 6.

вильно: изгиб луча должен быть в той его части, которая ближе всего к Солнцу S, т.-е. более влево, или Солнце S следует переместить немного направо) и проходящий мимо Солнца S, недалеко от его поверхности, должен подвергнуться некоторому искривлению, как бы гнутию; он изменяет свое направление. Если он дойдет затем до Земли T, то наблюдатель на Земле увидит звезду в том направлении, которое имеет луч после прохождения мимо Солнца; он ее увидит не в A, но в точке B. Ему покажется, что звезда сдвинута от Солнца, что она удалилась от него на некоторый угол. Теория Эйнштейна дает возможность вычислить величину этого угла и его зависимость от расстояния между центром Солнца и ближайшей к Солнцу

*) Примечание 11.

точкой луча. Оказывается следующее: если луч проходит мимо самой поверхности Солнца, т.-е. его расстояние от центра Солнца равно радиусу этого светила, то отклонение луча равно 1,7″ (угловой секунды). Кроме того, кажущееся отклонение звезды должно быть обратно пропорционально расстоянию луча от центра Солнца; если луч проходит в 2, 3 и т. д. раза дальше от центра Солнца, то отклонение звезды должно быть в 2, 3 и т. д. раза меньше *).

Так как мы не можем излагать математическую сторону теории, то мы постараемся, пользуясь простыми соображениями, выяснить причину и необходимость отклонения луча, проходящего недалеко от Солнца. Мы представим несколько таких соображений, как будто совершенно различных и ничего общего между собой не имеющих; в действительности они теснейше между собой связаны и представляют лишь как бы различные стороны одного и того же теоретического вывода.

Соображение первое. Пространство обладает вблизи Солнца большею внутренней кривизной, чем вдали от него, вследствие чего геодезические линии вблизи Солнца заметно отличаются от тех линий, которые мы называем прямыми и которые суть геодезические линии в участках пространства, далеких от Солнца. Свет также распространяется по линиям, которые вблизи поверхности Солнца искривлены, как показано на черт. 6.

Соображение второе. Всем известно явление преломления света, которое обнаруживается при переходе светового луча из одного вещества в другое, если скорость распространения света в двух веществах неодинаковая. Приэтом луч света, наклонно падающий на поверхность, отделяющую одно вещество от другого, приближается к нормали (прямая, перпендикулярная к этой поверхности), если скорость распространения света во втором веществе меньше его скорости в первом. Земля окружена атмосферой, которую можно мысленно разделить на горизонтальные слои, плотность которых убывает по мере удаления от поверхности земли. Чем плотнее воздух, тем меньше в нем скорость распространения света. Луч света от звезды, не находящейся в зените, переходит, пронизывая атмосферу, от верхних ее слоев к нижним, более плотным, причем его скорость постепенно уменьшается, хотя и весьма мало. Приэтом луч непрерывно преломляется, т.-е. меняет свое направление, причем угол между лучем и вертикальной линией (нормалью к атмосферным слоям) постепенно уменьшается. Это явление называется атмосферной рефракцией. Благодаря ей,

*) Примечание 12.

мы видим звезды как бы сдвинутыми вверх; этот сдвиг наибольший для звезд, находящихся вблизи горизонта.

Теория Эйнштейна приводит к результату, что скорость света зависит от гравитационного поля; с приближением к Солнцу скорость света уменьшается. Роль слоев атмосферы на Земле играют на Солнце слои гравитационного поля. В обоих случаях скорость света убывает по мере приближения к светилу (Земле или Солнцу); поэтому и результат должен быть один и тот же, а именно, луч света должен подвергаться искривлению, когда он, проходя мимо Солнца, пронизывает слои неодинакового гравитационного поля, соответствующего неодинаковой плотности слоев земной атмосферы.

Соображение третье. Мы видели (стр. 56), что энергия обладает массой; теперь понятно, что там шла речь о массе инертной. Далее, мы пришли к заключению, что всякая масса тождественна с определенным громадным запасом энергии; и здесь мы имеем дело с массой инертной. Но последняя равна массе весомой, а отсюда мы должны заключить, что и энергия обладает весомой массой. Если бы это было неверно, то мы получили бы недопустимый результат, что равенство инертной и весомой масс тела не могло бы иметь места при всех температурах, ибо при повышении температуры не менялась бы весомая масса тела, но увеличивалась бы его инертная масса вследствие возрастания инертной массы содержащейся в нем тепловой энергии. Итак, мы должны допустить, что энергия обладает не только инертной, но и весомой массой, что, напр., горячее тело имеет больший вес, чем тело холодное. Сказанное должно относиться ко всем видам энергии, а след. и к энергии световой, т.-е. свет должен обладать весом, он должен притягиваться Солнцем, как и всякое тело. Под влиянием этого притяжения происходит изменение направления, в котором движется световая энергия, т.-е. как раз искривление луча в ту сторону, которая указывается теорией Эйнштейна. Однако, это соображение указывает только на одну из причин искривления луча; к ней следует прибавить уклонение пространства от пространства Эвклида.

Соображение четвертое. В § 16 мы познакомились с принципом эквивалентности, который говорит, что наблюдатель, находящийся внутри системы (ящике, комнате), никакими наблюдениями не может отличить наличность гравитационного поля внутри системы от прямолинейного равноускоренного движения самой системы по направлению, противоположному направлению сил, действующих в гравитационном поле. Положим теперь, что в системе без гравитационного поля, движущейся прямолинейно и равноускоренно, распространяется

луч света и притом по направлению, перпендикулярному к направлению движения системы. Наблюдателю, находящемуся вне системы, представится, что луч распространяется по прямой линии. Наблюдатель же, находящийся внутри системы, заметит, что световой луч все быстрее и быстрее как бы «падает вниз», если считать, что система движется по направлению «вверх». Все это совершенно аналогично тому, что на стр. 80 было сказано о движении тела, брошенного внутри системы (без гравитационного поля) по направлению, перпендикулярному к движению системы. Для наблюдателя вне системы тело движется по инерции прямолинейно и равномерно; для наблюдателя внутри системы тело падает по кривой линии (параболе) вниз.

Теперь положим, что система остается неподвижной в данном гравитационном поле. Общий принцип относительности и связанный с ним принцип эквивалентности говорят, что в этой системе должны происходить те же явления, как и в системе, о которой мы только что говорили. А так как световой луч в этой последней системе несомненно представляется наблюдателю искривленным, то он таким же должен представиться наблюдателю в системе, покоющейся в гравитационном поле. Если бы этого не было, то наблюдатель мог бы определить, покоится ли его система в гравитационном поле, или она движется прямолинейно и равноускоренно, ибо в первом случае световой луч представился бы прямым, во втором—искривленным. Но такая возможность противоречила бы общему принципу относительности, а потому световой луч должен подвергаться искривлению, когда он распространяется в гравитационном поле.

Мы, так сказать, с четырех различных сторон подошли к одному и тому же результату, стараясь несколькими способами выяснить его связь с общей теорией относительности. Эйнштейн впервые в 1921 г. указал на явление отклонения светового луча, проходящего мимо Солнца, на недалеком от него расстоянии, т.-е. смещение звезды по направлению от Солнца. Такое смещение могло бы быть наблюдаемо во время полного солнечного затмения, если сфотографировать часть звездного неба, ближайшую к Солнцу. В 1914 г. немецкая экспедиция отправилась в Крым, где должно было наблюдаться полное солнечное затмение; возникшая война не дала возможности произвести наблюдения.

Чтобы указанный способ мог дать надежные результаты, необходимо, чтобы Солнце, в момент его полного затмения, находилось в такой части своего годичного пути (эклиптики), которая богата яркими звездами. Это условие выполнено 29-го мая, когда Солнце находится в звездной куче «Гиады». Благодаря счастливой случайности

произошло полное солнечное затмение, видимое в южном полушарии, как раз 29 мая 1919 г. и таковое же произойдет в 1938 г.; вообще же могут пройти тысячелетия, прежде чем повторится затмение при столь удачных обстоятельствах. Английские астрономы уже в марте 1917 г. обратили внимание на это обилие ярких звезд, которые должны были окружать Солнце во время полного затмения 1919 года, Они снарядили две научные экспедиции, из которых одна отправилась в Собраль (Sobral) в северной Бразилии, другая на Принцев остров в Гвинейском заливе у западного берега Африки. Та часть неба, где должно было находиться Солнце в момент полного затмения, была сфотографирована в Англии ночью в январе 1919 г., чтобы было с чем сравнить ту фотографию, которую надеялись получить во время затмения. В Собрале безоблачное небо чрезвычайно благоприятствовало наблюдениям; на Принцевом острове небо было неясное, но все же удалось получить фотографии с наиболее яркими звездами. В Собрале были получены семь превосходных снимков; всего на фотографиях оказались 13 различных звезд. Тщательное исследование снимков не оставляло ни малейшего сомнения в том, что изображения звезд на них были сдвинуты по направлению от Солнца. Величина сдвига оказалась, с достаточною точностью, обратно пропорциональной расстоянию звезды от центра Солнца. Если на основании измеренных сдвигов вычислить тот сдвиг, который получился бы для звезды, луч которой прошел бы мимо самой поверхности Солнца, то получится такой результат: наблюдения в Собрале дают сдвиг в 1,98″, а наблюдения на Принцевом острове—в 1,61″. Среднее из этих двух чисел равно 1,8″, что почти вполне согласно с выводом из общей теории относительности, которая, как было сказано, дает для этого же сдвига величину 1,7″. Таким образом, непосредственные наблюдения блестяще подтвердили предсказание Эйнштейна, как с качественной стороны, так и с количественной. Об окончательном результате работ обеих экспедиций был сделан доклад 6 ноября 1919 г. в торжественном заседании ученых; этот день дал Эйнштейну мировую славу.

Является, однако, вопрос о том, нельзя ли объяснить отклонение луча иным способом, причем, конечно, пришлось бы смотреть на совпадение наблюденного сдвига с тем, который предсказал Эйнштейн, как на странную случайность. Отклонение луча пытались объяснить тем, что Солнце окружено толстым слоем газов и паров; проходя через этот слой, лучи должны были менять свое направление, как мы это наблюдаем в нашей атмосфере (см. выше, соображение второе). Однако, вычисление показывает, что этот слой,

чтобы вызвать наблюденное отклонение светового луча, должен был бы обладать на высоте 640,000 километров над поверхностью Солнца такою плотностью, что весь слой должен был бы производить на поверхность Солнца давление в 10,000 атмосфер, что совершенно противоречит результатам спектрального исследования лучей, испускаемых поверхностью Солнца. Кроме того, лучи звезды должны были бы пройти внутри этого слоя путь, соответствующий пути в 16.000 километров через воздух при нормальном атмосферном давлении. При этом лучи должны были бы подвергнуться сильнейшему поглощению, между тем как на фотографических пластинках изображения звезд соответствуют их нормальной яркости. Кроме того, можно указать, что некоторые кометы проходили мимо Солнца на расстоянии, которое меньше выше указанного. В предполагаемом слое газов и паров они должны были бы встретить колоссальное сопротивление. Фактически наблюденное движение этих комет показывает, что если такой слой вообще существует, то его ничтожная плотность исключила бы всякую возможность заметного отклонения светового луча. Таким образом, этот способ объяснения эффекта, предсказанного Эйнштейном, должен быть безусловно отвергнут. Остается только признать, что наблюдения солнечного затмения 29 мая 1919 г. дали блестящее подтверждение одного из выводов общей теории относительности. Эта дата не будет забыта историей культурного развития человечества, как дата одной из величайших побед человеческого гения.

§ 22. Смещение спектральных линий. Всем известно, что накаленные до-бела твердые и жидкие тела испускают так называемые белые лучи, которые можно, напр., при помощи призмы, разложить на составные части, причем получается сплошной спектр, в котором обычно отличают семь главных цветов, в таком порядке: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Цвета постепенно переходят один в другой; один конец спектра красный, другой — фиолетовый. Нет никакого сомнения, что свет представляет распространяющееся в пространстве колебательное движение. Нам здесь нет надобности разбирать вопроса о том, что именно колеблется. Напомним, что в девятнадцатом столетии, примерно до 1884 г., господствовала в науке теория чисто механического колебания частиц светового эфира. Теперь мы знаем, что колеблются не частицы эфира, но величины электрических и магнитных сил в последовательных точках луча. Не входя ни в какие дальнейшие подробности, отметим только, что в луче света мы имеем дело с колебательным движением. Всякого рода колебания могут отличаться друг

от друга той быстротой, с которой они совершаются. Так, напр., длинный маятник колеблется медленно, короткий — быстро. Медленные звуковые колебания соответствуют низким тонам, более быстрые—тонам высоким. За характеристику быстроты колебаний мы примем их частоту, т.-е. число колебаний, совершаемых в единицу времени, напр., в одну секунду.

Разноцветные лучи спектра также отличаются друг от друга частотою, которая растет, если идти чрез спектр по направлению от его красного конца к фиолетовому. Наименьшая быстрота колебаний соответствует, в пределах видимого спектра, лучам красным, наибольшая— лучам фиолетовым. Первые аналогичны более низким звукам, последние— более высоким.

Светящиеся пары и газы не дают сплошного спектра. Если испускаемый ими свет разложить при помощи призмы, то получается спектр, состоящий из ряда ярких линий, расположенных в различных частях спектра и обладающих, конечно, тою окраской, которая соответствует занимаемым ими местам в спектре. Так, напр., светящийся водород дает видимый спектр, состоящий из пяти линий: одной красной, одной зеленой, одной синей и двух фиолетовых. Спектр светящихся паров меди содержит 11 линий; огромное число спектральных линий дают светящиеся пары железа. Число и расположение линий является характерным для данного светящегося вещества; каждая же спектральная линия характеризуется числом колебаний в секунду, соответствующим тому месту сплошного спектра, которое она занимает, или лучше наоборот: каждая линия занимает то положение, которое соответствует числу колебаний, происходящих в данном случае в течение одной секунды. Лучи, дающие одну спектральную линию, называются лучами однородными или монохроматическими (одноцветными). Если, по каким-либо причинам, число колебаний в луче изменится, то спектральная линия, соответствующая этому лучу, сместится в сторону красного или в сторону фиолетового конца спектра; первое произойдет, если число колебаний уменьшится, второе—если это число увеличится. Давно известны некоторые случаи изменения числа колебаний луча и вызванного этим изменением смещения спектральной линии в ту или другую сторону. Рассмотрим подробнее один из этих случаев и укажем вкратце на второй.

Обозначим буквой A источник света, испускающий лучи определенной частоты N, так что N есть число колебаний в одну секунду. Эти лучи дают одну спектральную линию, положение которой в спектре вполне определяется частотой N. Если бы число колебаний, вступающих в одну секунду в прибор, образующий спектр (спектроскоп), уменьшилось или увеличилось, то спектральная линия переместилась бы,

соответственно, к красному или фиолетовому концу спектра. На произвольном расстоянии от источника A находится наблюдатель B со своим спектроскопом. Положим сперва, что источник A и наблюдатель B неподвижны. В этом случае ясно, что в одну секунду доходят до B столько колебаний, сколько исходят в такое же время от источника A, т.-е. N колебаний, так что наблюдатель видит спектральную линию на надлежащем месте. Теперь предположим, что источник A неподвижен, но что наблюдатель B со своим спектроскопом движется вдоль прямой, соединяющей точки A и B, приближаясь к источнику A или удаляясь от него. Если он приближается к A, то он движется навстречу колебаниям и потому в его прибор вступает в одну секунду больше колебаний, чем если бы он оставался неподвижным, т.-е. больше N колебаний. Если же B удаляется от A, так что колебания, распространяющиеся вдоль луча, должны его догонять, то число колебаний, доходящих в одну секунду до наблюдателя, должно быть меньше N. Это видно уже из того, что если бы наблюдатель удалялся от A со скоростью, равною скорости света, то никакие колебания до него бы не доходили. В первом случае наблюдатель увидит в своем приборе спектральную линию смещенной к фиолетовому концу спектра, во втором — к красному.

Не трудно доказать, что нечто вполне аналогичное произойдет, если наблюдатель остается неподвижным, но самый источник света к нему приближается или от него удаляется; и в этом случае приближение источника к наблюдателю вызывает смещение спектральной линии к фиолетовому, удаление — к красному концу спектра. Соединяя все изложенное, мы можем сказать, что спектральная линия смещается к фиолетовому концу спектра, когда источник света и наблюдатель приближаются друг к другу; она смещается к красному концу, когда они удаляются друг от друга. Выражение зависимости числа колебаний, воспринимаемых наблюдателем, от относительного движения источника и наблюдателя, представляет так называемый принцип или эффект Доплера (Doppler, 1842), применимый не только к световым лучам, но и вообще ко всякого рода распространяющимся колебательным движениям, напр., к явлениям звуковым. Когда источник звука и наблюдатель приближаются друг к другу, то звук повышается; когда они удаляются друг от друга, то звук понижается.

Смещение спектральной линии далекого источника может быть измерено, если сравнить ее положение в спектре с положением спектральной линии источника того же самого рода, помещенного неподвижно рядом со спектроскопом. Такие измерения играют огромную роль в астрофизике, давая возможность определить ту скорость, с которой светило, спектр которого исследуется, и Земля друг к другу приближаются или друг от

друга удаляются, т.-е. так называемую радиальную относительную скорость *). Возможность измерить смещение основана на том, что мы находим в спектре небесных светил знакомые нам линии, напр., ряд линий светящегося водорода; положение этих линий мы сравниваем с положением линий водорода, светящегося в стеклянной трубке, через которую проходит электрический ток. Любопытно, что этот способ определения радиальной скорости светила совершенно не зависит от того, на каком от нас расстоянии это светило находится, если только оказывается возможным получить и исследовать его спектр. Поэтому он одинаково применим к планетам, к Солнцу, к неподвижным звездам и даже к туманным пятнам. Этот способ дает нам не только сведения о движении самого светила, но и о тех движениях, которые происходят на его поверхности. Это относится, прежде всего, к Солнцу, которое окружено слоем светящихся паров и газов. Существует возможность наблюдать спектр этого слоя при таких условиях, при которых сплошной солнечный спектр устранен. Тут замечаются значительные смещения спектральных линий, указывающие на бурные движения, происходящие в слое светящихся паров и газов.

Упомянем лишь вкратце, что давление, под которым находится светящийся газ или пар, влияет на частоту колебаний в испускаемых ими лучах, а следовательно и на положение их спектральных линий; при увеличении давления эти линии немного смещаются к фиолетовому концу спектра. Это явление открыли Гемфрейс и Молер (Humphreys, Mohler, 1896); оно затем было подтверждено наблюдениями других ученых.

В обоих рассмотренных случаях мы, на практике, имеем дело с весьма малыми смещениями спектральных линий. Так, в эффекте Доплера мы имеем дело со смещением, величина которого зависит от отношения той скорости, с которой источник и наблюдатель приближаются друг к другу или удаляются друг от друга, к скорости света; но мы уже не однократно указывали, что скорости движения тел всегда очень малы сравнительно со скоростью света (мы исключаем случай движения электронов), а потому и смещения линий весьма незначительны.

Общий принцип относительности приводит к следующему результату. спектральные линии газов и паров, находящихся на Солнце, должны быть несколько смещены к красному концу спектра. Это смещение совершенно независимо от тех смещений, о которых мы только что говорили, т.-е. от эффекта Доплера и от влияния существующего на Солнце давления. Укажем два соображения, из которых каждое

*) Примечание 13.

приведет нас к заключению о необходимости «красного смещения» солнечных спектральных линий.

Соображение первое. На стр. 80 было сказано, что общая теория относительности приводит к результату, что время течет на поверхности Солнца медленнее, чем на поверхности Земли. Отсюда мы вывели, что продолжительность всякого явления на Солнце больше продолжительности того же явления на Земле, причем предполагалось, что условия, внешние и внутренние, при которых явление происходит, на Солнце и на Земле совершенно одинаковые. Таким явлением может быть возникновение каждого отдельного из ряда последовательных световых колебаний. Если определенный газ или пар светится на Солнце, то продолжительность каждого колебания, если его наблюдать с Земли, должна оказаться больше, чем продолжительность колебания в лучах, испускаемых тем же газом или паром, находящимися на Земле. Световые колебания. возникающие на Солнце, достигают Земли, и здесь число колебаний в одну секунду (по времени на Земле) или частота этих колебаний будет меньше частоты колебаний в лучах, испускаемых на Земле. Поэтому спектральная линия источника на Солнце должна быть смещена к красному концу спектра сравнительно со спектральной линией источника такого же рода на Земле.

Соображение второе. Обратимся вновь к принципу эквивалентности, которому был посвящен § 16, и которым мы пользовались на стр. 92 (соображение четвертое). Положим, что имеется система в виде весьма длинной и широкой трубы или башни. Для удобства представляем себе, что ось трубы расположена вертикально и что можно говорить о нижнем и о верхнем концах системы; но всем этим словам мы придаем совершенно условное значение, так как система не находится на земной поверхности, а свободно может двигаться в пространстве. Система снизу открыта, она стоит на какой-либо площадке; никакого гравитационного поля внутри системы нет. Предположим, что в некоторый момент времени источник света, расположенный на упомянутой площадке внутри системы, т.-е. как бы на ее дне, начинает испускать лучи по направлению вверх, и притом лучи однородные, дающие определенную спектральную линию. Допустим, далее, что в этот же момент вся система начинает двигаться прямолинейно и равноускоренно по направлению вверх, причем площадка и находящийся на ней источник света остаются на месте; они не участвуют в движении системы. Где-нибудь в верхней части системы находится наблюдатель со своим спектроскопом, в который вступают идущие снизу лучи. Если бы система не начала двигаться, т.-е. оставалась стоять на площадке, то наблюдатель увидел бы в своем приборе спектральную линию на том месте,

которое определяется числом колебаний в луче, который испускается источником. Но когда система движется равноускоренно, то наблюдатель уже будет обладать некоторою скоростью, когда луч до него дойдет. Чем выше находится наблюдатель, тем позже до него дойдет луч и тем больше будет скорость его движения, так как вся система движется ускоренно. С этой скоростью наблюдатель удаляется от источника световых лучей, и потому он, на основании принципа Доплера, увидит спектральную линию смещенной к красному концу спектра.

Принцип эквивалентности говорит, что наблюдатель не может отличить случая прямолинейного, равноускоренного движения своей системы при отсутствии в ней гравитационного поля, от случая, когда система неподвижна, и в ней имеется гравитационное поле, в котором тела «падают» по направлению (вниз), обратному направлению движения системы (вверх). Так как в первом случае наблюдатель находит смещение спектральной линии лучей, идущих по направлению его ускоренного движения, то он такое же смещение должен найти и во втором случае, когда лучи имеют то же самое направление, т.-е. от тех масс которые вызывают гравитационное поле, и которые находятся «внизу» т.-е. под системой. Из сказанного следует, что лучи, возникающие вблизи больших масс, должны давать спектральную линию, смещенную к красному концу спектра, если их исследовать вдали от этих масс; это должно относиться и к лучам, испускаемым газам и парами на солнце.

Теория дает возможность вычислить величину этого смещения. Она оказывается настолько малою, что лишь с величайшим трудом она могла бы быть замечена и измерена; она очень мало превышает неизбежные ошибки наблюдений. К этому следует прибавить, что многие спектральные линии Солнца, как уже было сказано, оказываются смещенными вследствие разнообразных движений светящихся газов и паров на Солнце (принцип Доплера); кроме того, возможны смещения, вызванные большим давлением, под которым эти газы и пары могут, местами, находиться (явление Гемфрейса и Молера). Эти две причины могут вполне маскировать то весьма малое «красное» смещение, которого требует теория Эйнштейна. Исследования некоторых ученых, старавшихся решить вопрос о существовании этого последнего смещения, не дали настолько ясных результатов, чтобы они не вызывали сомнений. Но в начале 1921-го года появились работы французских ученых, во-первых, Перо (Pérot) во-вторых, Фабри и Бюиссона (Fabry, Buisson), которые, повидимому, не оставляют никакого сомнения в том, что предсказанное Эйнштейном смещение солнечных спектральных линий действительно существует *).

*) Примечание 14.

§ 23. Заключение. Мы изложили то, сравнительно, немногое, из теории относительности Эйнштейна, что может быть представлено в форме, доступной не-специалистам по физике и математике. Нам пришлось ограничиться указанием основ, на которых эта теория построена, и перечнем результатов, к которым она приводит. Легко понять, что эти результаты должны были привлечь к себе особое внимание астрономов, и притом как тех, которые занимаются, главным образом, вопросами, относящимися к нашей солнечной системе, так и тех, которые изучают вопросы космического характера, вызываемые миром звездных систем, туманных пятен и т. д. Астрономия замкнутого в самом себе пространства, в котором господствует неэвклидова геометрия, неодинаковая в различных его участках, и основной закон всемирного тяготения перестает быть точным, астрономия в мировом пространстве Эйнштейна должна, в принципе, существенно отличаться от астрономии в бесконечном пространстве Эвклида с единою повсюду геометрией, т.-е. от астрономии Ньютона, Лапласа и Леверье. Достижения старой астрономии остаются неприкосновенными, хотя они отчасти и являются в новом освещении; но общие научные горизонты, суженные в одном направлении, расширяются в другом; возникают новые возможности, предчувствуется новый прогресс астрономии в связи с более глубоким уразумением космических явлений.

Те результаты теории Эйнштейна, которым были посвящены три последних параграфа, дают нам достаточное основание считать эту теорию не плодом фантазии, но правдивым изображением действительности. Она дает нам детально разработанную, стройную и законченную картину мира, раскрывает нам новое, логически построенное миропонимание, достижением которого может гордиться человечество.

ПРИМЕЧАНИЯ.

Примечание 1.

Обозначим через d расстояние точек P и Q друг от друга; пусть t_1 время прохождения звука от P до Q, t_2 время распространения звука от Q до P. Тогда

$$t_1 = \frac{d}{w - v}, \qquad t_2 = \frac{d}{w + v}.$$

Отсюда

$$t_1 - t_2 = \frac{2v}{w^2 - v^2} d.$$

Первые две формулы дают

$$w = \frac{d(t_1 + t_2)}{2 t_1 t_2}, \qquad v = \frac{d(t_1 - t_2)}{2 t_1 t_2}.$$

Примечание 2.

Формула Френеля следующая:

$$v' = \frac{n^2 - 1}{n^2} v,$$

где v скорость тела, v' скорость, с которою увлекается эфир, n показатель преломления тела. Скорость света внутри покоющегося прозрачного тела равна $c:n$, где c скорость света в пустоте. Отсюда следует, что скорость света c' в движущемся теле равна

$$c' = \frac{c}{n} \pm v' = \frac{c}{n} \pm \frac{n^2 - 1}{n^2} v \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

где верхний знак (+) относится к случаю распространения света по направлению движения тела, а нижний знак (—) к распространению в противоположном направлении.

Примечание 3.

Пусть d расстояние двух точек на Земле; t_1 время прохождения светом пути d, туда и обратно, когда d имеет направление движения

Земли; t_2 время в том случае, когда d расположено перпендикулярно к направлению движения Земли. Тогда легко доказать, что

$$t_1 - t_2 = \frac{d}{c} \cdot \frac{v^2}{c^2},$$

где c скорость света в воздухе. Опыт был построен на наблюдении интерференционных полос. Когда весь прибор, плававший на ртути, поворачивался на прямой угол, то два направления распространения света обменивались ролями, и это должно было вызвать смещение интерференционных полос, равное ширине N полос, причем

$$N = \frac{2d}{p} \cdot \frac{v^2}{c^2},$$

где p длина волны применявшихся лучей. В опытах Морлея и Миллера ожидалось смещение равное ширине $N = 1{,}5$ полосы, между тем, как не произошло даже смещения на 0,008 полосы, которое, при обстановке опыта, было бы еще замечено.

Примечание 4.

Вычисляя, какое влияние должно иметь движение Земли на то или другое явление, мы почти всегда встречаемся с некоторой величиной, которую мы обозначим через β, и которая весьма мало отличается от единицы. Эта величина равна

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

где v скорость Земли (30 килом. в сек.), а c скорость света (300,000 килом. в сек.), так что $v^2 : c^2 = 1 : 10^8$. Приближенно

$$\beta = 1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{5}{10^9} = 0{,}999999995.$$

Отступлением этой величины от единицы определяется, вообще говоря, порядок тех весьма малых величин, которыми должно было обнаружиться ожидавшееся влияние движения Земли. Опыты всегда ставились таким образом, что они могли обнаружить еще значительно меньшие влияния. Величина β тем более отступает от единицы, чем больше скорость v. Если бы мы имели $v = c$, то β превратилось бы в нуль и это соответствовало бы бесконечно большому влиянию на физические явления.

Пусть d длина стержня, покоющегося или движущегося по направлению, перпендикулярному к его длине. Если он станет двигаться по направлению длины, то, по гипотезе Лоренца и Фицжеральда, длина d уменьшается до величины

$$d' = \beta d = d\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

При малых v (сравнительно с c) можно принять

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

когда v приближается к c, то d' приближается к нулю.

Примечание 5.

Выражая математически второй постулат, можно вполне элементарным вычислением получить две основные формулы принципа относительности. Положим, что скорость v системы S' относительно системы S имеет направление некоторой прямой, которую можно принять за координатную ось x. Так как все точки плоскости, перпендикулярной к v (т.-е. к оси x) ничем друг от друга не отличаются, т.-е. движутся одинаково, то мы можем ограничиться рассмотрением только точек, лежащих на этой прямой, которую мы можем себе представить геометрически принадлежащей обеим системам. В системе S находится на этой прямой точка O; произвольная другая точка P той же системы, лежащая, как условлено (не будем далее этого повторять), на той же прямой, находится на расстоянии x от точки O. Время системы S обозначим через t. Положим, что на той же прямой находится в системе S' точка O'; произвольную другую точку системы S' обозначим через P' расстояние между P' и O' через x', и время системы S' через t'. Расстояние x и время t воспринимаются и измеряются наблюдателями A системы S, а расстояние x' и время t' — наблюдателями A' системы S'. Наблюдателям A представляются точки O и P неподвижными, а точки O' и P' движущимися вдоль нашей прямой со скоростью v; наблюдатели A', наоборот, видят точки O' и P' неподвижными, а точки O и P движущимися со скоростью v в обратную сторону, или, что то же самое, со скоростью $-v$. Проще всего представить себе, что мы имеем как бы две совпадающие прямые линии, из которых одна связана с системой S, другая — с системой S', и которые как бы скользят одна по другой. Впрочем, можно также представить себе, что эти прямые расположены рядом, недалеко друг от друга.

При относительном движении двух систем должно случиться, что точки O и O' окажутся рядом; положим, что при этом часы в O и в O' показывают одинаково $t = 0$ и $t' = 0$. С большой оговоркой и весьма условно можно было бы сказать, что «с этого момента» в обеих системах начинается счет времени. Эта фраза может вызвать большие недоразумения, если ее не разъяснить подробнее. Дело в том, что слова «в этот момент» не имеют смысла, так как нет «времени» вообще, а есть только время определенной системы. Мы можем только сказать, что в тот момент времени системы S, когда O и O' находятся рядом, все часы этой системы показывают время $t = 0$, а в системе S' только часы в O' показывают время $t' = 0$, а все остальные — разные другие времена t'. С другой стороны, в тот момент времени системы S', когда O и O' расположены рядом, все часы этой системы показывают время $t' = 0$, а в системе S только часы в O показывают $t = 0$, а все остальные — разные другие времена t.

Это вполне подтверждается и разъясняется теми формулами, которые будут ниже приведены.

Относительно точек P и P' мы предположим, что точка P' еще не дошла до P, когда O' находится рядом с O; это значит, что $O'P'$ гораздо меньше OP. Рассмотрим теперь, что получится, когда, при дальнейшем движении системы S', точка P' окажется рядом с точкой P вспомним, что мы положили $OP = x$ и $O'P' = x'$. Часы в P показывают время t, часы в P' время t'. По обычным, старым представлениям мы должны ожидать, что

$$\left.\begin{aligned} t' &= t \\ x' &= x - vt \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

ибо прошло «время» t от момента встречи точек O и O' до момента встреча точек P и P'; система за это «время» передвинулась на расстояние $OO' = vt$ и мы имеем очевидно $x' = O'P' = OP' - OO' = OP - OO' = x - vt$.

Второй постулат приводит к двум равенствам, связывающим величины x, t, x' и t' между собою, а именно:

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{1}{\beta}(x - vt) \\ t' &= \frac{1}{\beta}\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

где, как и выше (примеч. 4), $\beta = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Вместо равенства (4) мы получаем, **как неизбежное следствие второго начала**, равенства (5), которые и представляют математические основы специального принципа относительности. Когда v мало сравнительно со скоростью света c, мы имеем $\beta = 1$ и (5) переходит в (4). Формулы (5) дают

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{1}{\beta}(x' + vt') \\ t &= \frac{1}{\beta}\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

Эти равенства по форме совершенно тождественны с равенствами (5) с тою только разницей, что вместо $+v$ стоит $-v$, когда мы от величины x' и t' системы S' переходим к величинам x и t системы S. Это и выражает равноценность систем S и S' и безусловно относительный характер их движений.

Положим, что в системе S' находятся две точки P' и Q', расстояния которых от O' наблюдатель A' находит равным x_1' и x_2', а след. расстояние d' их друг от друга

$$d' = x_2' - x_1'.$$

Два наблюдателя системы S находят, что эти точки одновременно, т.-е. в одно и то же время t системы S, совпадают с двумя точками

P и Q системы S, которые находятся на расстояниях x_1 и x_2 от O, так что их расстояние d друг от друга равно

$$d = x_2 - x_1.$$

Первое из равенств (4) дает

$$x_2' = \frac{1}{\beta}(x_2 - vt), \qquad x_1' = \frac{1}{\beta}(x_1 - vt).$$

Отсюда

$$x_2' - x_1' = \frac{1}{\beta}(x_2 - x_1)$$

т -е.

$$d = \beta d. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Длина d', напр., стержня оказывается для наблюдателей A уменьшенной в β раз. Если, наоборот, d длина PQ стержня в S, то наблюдатели A' в S' нашли бы аналогичным способом длину d, опять-таки уменьшенною,

$$d' = \beta d \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Легко понять, что (8) вовсе не противоречит равенству (7), так как одновременность (t) в S и одновременность (t') в S' не одно и то же. Формулы (7) и (8) тождественны с формулой (3) Лоренца и Фицжеральда (см. примеч. 4). В тексте была указана глубокая между ними разница.

Примечание 6.

Теория относительности дает для относительной скорости u выражение

$$u = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{c^2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Когда v и v' малы сравнительно со скоростью c, то получается $u = v + v'$. Если в (9) принять $v' = c$, то при всяком v получается $u = c$; даже если $v = c$ и $v' = c$ получается $u = c$.

Примечание 7.

Любопытно, что формула (9) предыдущего примечания приводит к формуле Френеля (см. примеч. 2), которая принимает вид

$$c' = \frac{c}{n} + \frac{n^2 - 1}{n^2} v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

если свет распространяется по направлению течения воды. В ней c' скорость света (относительно покоющегося наблюдателя) в движущейся воде. Итак, вода (S') движется относительно наблюда-

теля (S) со скоростью v; свет (S'') движется относительно воды со скоростью $v' = c : n$ Скорость c' света (S'') относительно наблюдателя (S) получится, если в формуле (9) написать c n вместо v и c' вместо u Тогда она даст

$$c' = \frac{v + \frac{c}{n}}{1 + \frac{v}{cn}}.$$

Когда v мало сравнительно со скоростью c, мы получаем

$$c' = v + \frac{c}{n}\left(1 - \frac{v}{cn}\right) = \frac{c}{n} + \frac{n^2 - 1}{n^2} v,$$

т.-е формулу Френеля.

Примечание 8.

Принцип относительности приводит к результату, что масса m_0, покоющаяся в системе S', оказывается в системе S равной

$$m = \frac{m_0}{\beta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

где β имеет то же значение, как в примеч 4 и 5. Отсюда следует, что увеличение массы равно

$$\mu = m - m_0 = m_0\left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \quad \ldots\ldots\ldots (12)$$

Примечание 9.

Для кинетической энергии получается выражение

$$\eta = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \quad \ldots\ldots\ldots (13)$$

или приближенно

$$\eta = \frac{1}{2} m v_0^2 \left\{1 + \frac{3}{4}\frac{v^2}{c^2} + \ldots\right\}.$$

Мы видим, что обычное выражение кинетической энергии представляет лишь первое приближение, относящееся к случаю, когда v весьма мало сравнительно со скоростью c; при больших v энергия может быть гораздо больше $\frac{1}{2} m v^2$, а при $v = c$, когда $\beta = 0$, она делается бесконечно большою. Сравнивая (12) и (13), мы видим, что $\eta = \mu : c^2$, откуда и получаются все изложенные в тексте результаты.

Когда тело движется, то его масса равна m, а потому весь запас E его энергии равен

$$E = mc^2 = \frac{m_0}{\beta} c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

откуда

$$E = m_0 c^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \ldots \right\}$$

или

$$E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \frac{3}{8} m_0 \frac{v^4}{c^4} + \ldots$$

Эта формула и выражает то, что в тексте было сказано о величине $\frac{1}{2} m_0 v^2$.

Если тело обладает в системе S абсолютною температурой T, то в системе S' его абсолютная температура T' определяется формулой

$$T = T\beta = T\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Примечание 10.

Пусть m_t инертная масса некоторого тела, а m_p его весомая масса. Первая определяется из равенства

$$f = m_t \, w$$

где f сила, действующая на тело, w приобретаемое телом ускорение. Сила притяжения f между этим телом и другим телом, масса которого M, выражается формулой

$$f = k \frac{m_p \, M}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

где r расстояние двух тел друг от друга, k множитель пропорциональности. Сравнение двух выражений дает

$$m_t \, w = k \frac{m_p \, M}{r^2}$$

или

$$w = k \frac{m_p}{m_t} \frac{M}{r^2}$$

Но w для всех тел одно и то же, если M масса Земли; отсюда следует, что отношение $m_p : m_t$ для всех тел одинаковое. Если выбрать единицы так, как сказано в тексте, получаем $m_t = m_p$.

Примечание 11.

Эксцентриситет орбиты Меркурия равен 0,2056, между тем как он для орбиты Венеры всего равен 0,0068. Когда планета совершает один полный оборот, то перигелий смещается на угол

$$\varphi = \frac{24 \pi^3 a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)},$$

где a большая полуось орбиты, T время оборота планеты вокруг солнца и e эксцентриситет орбиты.

Примечание 12.

Угол φ, на который поворачивается луч, проходящий мимо Солнца определяется формулой

$$\varphi = \frac{4kM}{c^2 r}$$

где k множитель пропорциональности формулы (14), M масса Солнца и r разстояние луча от центра Солнца. Для луча, проходящего мимо самой поверхности Солнца, имеем, если пользоваться единицами *C. G. S.* (сантим., грамм, секунда), $r = 7.10^{10}$ см; далее $M = 2.10^{33}$ гр., $k = 6{,}7\ 10^{-8}$. Вставив эти числа, получаем $\varphi = 1{,}7''$.

Примечание 13.

Пусть N число колебаний, испускаемых в одну секунду источником колебаний, N' число колебаний, воспринимаемых в одну секунду наблюдателем. Старая теория приводит к формуле

$$N' = N\frac{V+v}{V-v'} \quad \ldots\ldots\ldots (15)$$

в которой V скорость распространения колебаний, напр., волн на поверхности воды, когда источник есть тело (вертикальный стержень), ударяющее N раз в секунду по поверхности воды, или звуковых колебаний (скорость звука); v есть скорость наблюдателя, v' скорость источника, причем v и v' суть скорости относительно среды, передающей колебания, и обе скорости считаются положительными, когда расстояние между источником и наблюдателем уменьшается, так что положительные скорости v и v' имеют противоположные направления. Формула (15) вполне приложима к волнам на поверхности жидкости и к колебаниям звуковым, в последнем случае v и v' суть скорости наблюдателя и источника относительно неподвижного воздуха. Если v и v' малы сравнительно со скоростью V, то вместо (15) можно написать

$$N' = N\left(1 + \frac{u}{V}\right) \quad \ldots\ldots\ldots (16)$$

где

$$u = v + v'$$

есть относительная скорость, с которой наблюдатель и источник приближаются друг к другу.

До возникновения теории относительности формула (15) применялась и к световым явлениям, для которых $V = c$. Но в ней v и v' обозначают скорости относительно эфира, т.-е абсолютные скорости, самое понятие о которых недопустимо. Теория относительности приводит к бо-

лее сложным формулам, которых мы не выписываем. Однако, если скорость u, с которой наблюдатель и источник удаляются друг от друга, мала сравнительно со скоростью света c, то формула (16) остается верной; в ней надо вставить $V = c - u$ вместо u, так что получается

$$N' = N\left(1 - \frac{u}{c}\right).$$

Этой формулой и приходится пользоваться при тех соображениях, которые приведены в тексте

Примечание 14.

Если длина волны луча равна 4000 A (A = ангстрем = 10^{-7} мм), каковой луч соответствует фиолетовому концу видимого спектра, то смещение соответствующей спектральной линии солнца равно всего 0.008 A. Для сравнения укажем, что расстояние друг от друга двух желтых линий D_1 и D_2 паров натрия равно 6 A; оно в 750 раз больше ожидаемого смещения.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

стран.

§ 1. Предисловие 3
§ 2. А. Эйнштейн и две части его принципа относительности 5
§ 3. Покой и движение 12
§ 4. Система. Принцип относительности Ньютона 16
§ 5. Вопрос об эфире. Опыт Майкельсона 20
§ 6. Гипотеза Лоренца и Фицжеральда. Первая работа Эйнштейна: постулаты . 25
§ 7. Понятие о времени в специальном принципе относительности 29
§ 8. Размеры и форма тел 36
§ 9. Некоторые следствия, вытекающие из постулатов специального принципа относительности. Сложение относительных скоростей. 41
§ 10. Масса, энергия и температура 45
§ 11. Об инерции или косности тел 50
§ 12. Несколько слов о геометрии 54
§ 13. Мировое пространство конечно или бесконечно? 57
§ 14. Основы общего принципа относительности 63
§ 15. Весомая масса и инертная масса 65
§ 16. Принцип эквивалентности 68
§ 17. Чем мы должны ограничиться 72
§ 18. Важнейшие выводы общего принципа относительности 74
§ 19. Концентрация лучей; фантомы 81
§ 20. Проверка результатов теории относительности. Движение планеты Меркурия . 85
§ 21. Отклонение световых лучей солнцем 90
§ 22. Смещение спектральных линий 95
§ 23. Заключение. 101
Примечания. 103