



А.С. КОМПАНЕЕЦ

ПРОСТРАНСТВО и ВРЕМЯ
В ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ


ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЗНАНИЕ

ФИЗИКА и ХИМИЯ

1961
СЕРИЯ IX

19—20

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

А. С. КОМПАНИЕЦ

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ
В ТЕОРИИ
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва

1961

РОЖДЕНИЕ НАУКИ О ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ

Человек стал изучать свойства пространства и времени с глубокой древности. Там, где развивались земледельческие культуры, в Египте и Вавилонии, потребность в точном измерении участков земли привела к зарождению геометрии на плоскости; впоследствии успехи строительного искусства вызвали к жизни и геометрию в пространстве. Земледелие требовало также развития календаря для предсказания сроков посева, жатвы, наступления дождливого периода или разлива рек. Так начиналось изучение времени.

Закономерность связи культурного и экономического развития общества особенно хорошо видна из того, что начатки знаний о пространстве и времени возникли независимо от Египта и Вавилонии в Китае, в Центральной Америке и, вероятно, в Индии. Эти знания первоначально составляли монополию жреческого сословия и сохранялись в тайне от непосвященных.

Пока геометрия и астрономия (неразрывно связанная с календарем) находились под контролем жрецов, развитие их шло очень медленно. Ошибки закреплялись традицией и авторитетом, вновь посвящаемые постигали всю премудрость в таком возрасте, когда они не могли уже творить самостоятельно.

Только в древней Греции наука по-настоящему стала светской. Греческие математики привели геометрию в стройную систему, закрепленную Евклидом в его знаменитом труде. Евклид постарался возвести здание геометрии, основываясь на наименьшем возможном числе допущений, или постулатов.

В дальнейшем, постулатами стали считать самоочевидные истины, не столько недоказуемые логически, сколько не требующие доказательств. Мы увидим, какая титаническая работа мысли понадобилась для того, чтобы понять относительный характер истины, заключенной в постулатах Евклида, и связать геометрию с реальным пространством и временем современного естествознания.

Велики были успехи древних и в астрономии, хотя им так и не удалось покончить с геоцентрической системой мира, в которой Земля помещалась в центре мироздания. Отдельные мыслители, например Аристарх, были приверженцами гелиоцентрической системы; ее же придерживался Архимед в своем сочинении о числе песчинок, которые могли бы заполнить вселенную. Есть указания на то, что в первоначальной редакции «Альмагеста» Птолемея тоже была изложена гелиоцентрическая система мира, но в дальнейшем эта книга была искусно фальсифицирована жрецами и приобрела свой нынешний вид, так что с именем Птолемея теперь связывается геоцентрическая система мира, окончательно отвергнутая только в новое время Коперником.

Однако самая возможность такой подделки требовала высокого развития астрономических знаний — ведь на основании «Альмагеста» можно было заранее предсказывать положения планет на небе; ясно, что это не было возможно в каком-нибудь варварском построении вроде тех, которые религия преподносила людям в средние века.

Так или иначе созданию современного календаря мы обязаны наблюдательной и теоретической астрономии древних. Их высокоразвитые представления о времени оставались незыблемыми в естествознании нового времени в течение столетий.

Столь же незыблемыми были и геометрические представления древних. Они казались скорее свойствами человеческого ума, чем реальной действительности. Полагали, что здравый рассудок не может подвергнуть их сомнению.

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ ПОСЛЕ НЬЮТОНА

Расцвет математики в античном мире был недолговременным и закончился задолго до того, как вся культура древности пришла в упадок. Систематические физические знания у древних вообще не успели возникнуть — физика есть целиком достояние культуры нового времени. Можно назвать много великих имен, от которых ведет свое начало физическая наука, но ни к кому это не относится с таким правом, как к Ньютону. Он сформулировал законы механики, лежащие и по сей день в основе всей физики в целом, каким бы глубоким перестройкам они ни подвергались в естествознании XX века.

Ньютон применил законы механики к движению небесных тел и добился, выражаясь современным языком, ошеломляющего успеха: в течение тысячелетий астрономия могла только описывать перемещение планет в пространстве, не ведая движущей причины, Ньютон указал эту причину и нашел

простые закономерности, точно отражающие невообразимо сложное движение тел в солнечной системе.

Так как движение тел происходит в пространстве и во времени, Ньютон отчетливо высказал те свойства пространства и времени, которые лежат в основе сформулированных им законов механики. Однако он не указал на их взаимосвязь, выраженную в том, что наблюдаемые закономерности движения в свою очередь проверяют правильность аксиом геометрии и законность способа измерения времени.

Не следует считать недостатком механики Ньютона то обстоятельство, что он не раскрыл эту взаимосвязь: она реально не сказывалась на количественных результатах теории применительно к тем объектам, которые изучает ньютоновская механика. Эти объекты — макроскопические тела, движущиеся со скоростями, значительно меньшими, чем скорость света (макроскопическими называются тела, состоящие из очень большого числа атомов, вроде пуль, снарядов, ракет и большие; микроскопические тела имеют атомные масштабы).

Значение скорости света в механике будет показано ниже. Важно отметить, что Ньютон имел право сделать те предположения о свойствах пространства и времени, на которых основаны его законы движения.

Физическую теорию называют правильной, если она имеет определенную область применения, где она не противоречит себе и опытным фактам. Такой теорией является ньютоновская механика. Дальнейшее развитие теории не отменяет и не опровергает правильную теорию, а только расширяет ее понятия так, чтобы охватить новые области применения. Это неразрывно связано с объективным характером физических знаний.

В основе механики Ньютона лежит представление об абсолютности пространства и времени. Более точно это означает следующее. Если имеются двое одинаковых часов, равномерно движущихся друг относительно друга, то эти часы всегда будут показывать одно и то же время, с какой бы скоростью они не двигались и как бы далеко друг от друга не отстояли; два твердых масштаба равной длины при тех же условиях тоже всегда будут равными. Разумеется, эта формулировка принадлежит не самому Ньютону, она вытекает из анализа ньютоновской механики на основе нынешних понятий. Но это не меняет существа дела.

Одинаково идущие часы называются синхронными. Таким образом, Ньютон считал, что в любой точке пространства равномерно движущиеся с любой скоростью часы будут показывать одно и то же время. Ньютон прекрасно знал, что движение относительно (понятие относительности движения восходит к Галилею), поэтому существенно, что измеряющие время часы в общем случае могут и должны двигаться друг

относительно друга и притом показывать одно и то же время. Если бы какие-нибудь часы показывали всегда наименьшее время, то их движение надо было бы считать абсолютным. Абсолютного движения Ньютон не допускал, но считал абсолютным само время, то есть показания всех часов. Здесь не обязательно подразумевать часовой механизм, сделанный человеком, роль часов может играть и естественный периодический процесс типа вращения Земли вокруг оси.

Абсолютность времени органически связана с законами движения Ньютона, ничему другому они соответствовать и не могут. Чтобы понять, почему это так, вспомним закон тяготения: два тела притягивают друг друга с силой, прямо пропорциональной массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния. Если одно тело сместится на некоторое расстояние, другое мгновенно это почувствует по изменению силы тяжести (по крайней мере, в принципе, а это только и важно в теории). Ведь в закон тяготения входит мгновенное значение расстояния между телами. Такое изменение силы тяжести можно назвать гравитационным сигналом: согласно закону Ньютона эти сигналы передаются мгновенно. Но отсюда следует, что при сверке часов путем гравитационных сигналов не надо вводить поправки на запаздывание сигналов. Имея возможность мгновенно сверить время всех часов во всех точках пространства, мы тем самым получаем возможность установить во всем пространстве единое мировое время на всех часах — абсолютное время Ньютона.

Уточненный закон тяготения Эйнштейна показывает, что и гравитационный сигнал распространяется со скоростью света, как обычный радиосигнал, применяемый для сверки часов. Поэтому тяготение фактически не дает возможности, даже принципиальной, установить описанным способом единое мировое время, но в рамках ньютоновской теории тяготения такое время должно было существовать с необходимостью.

Приняв, что время абсолютно, нетрудно убедиться, что абсолютна и длина твердого масштаба. Действительно, имея два твердых масштаба, можно мгновенно и одновременно сравнивать их длину с помощью (пусть воображаемых) гравитационных сигналов. Таким образом будет установлен универсальный мировой эталон длины для всех тел во вселенной, как бы они ни двигались друг относительно друга. Возможность такого эталона и подразумевал Ньютон, говоря об абсолютности пространства.

Полное согласие всех наблюдаемых фактов из области механики макроскопических тел с законами Ньютона породило укрепившуюся в течение столетий веру не только в абсолютность пространства и времени, но и в абсолютность

самих законов механики. Только развитие иных областей физики, неопровержимость новых фактов, не согласующихся с механикой Ньютона, заставили увидеть относительный характер заключенной в ней истины. Но при этом подверглись пересмотру и представления Ньютона об универсальности времени и абсолютности пространства.

РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О СВЕТЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Одновременно с механикой интенсивно развивалось учение о свете — оптика. Но если в механике законы Ньютона сразу внесли полную ясность во все принципиальные вопросы, в оптике с самого начала возник «проклятый» вопрос о природе света.

Ньютон предполагал, что свет распространяется в виде легчайших частиц — корпускул. Эта гипотеза объясняла прямолинейность световых лучей, отражение и преломление света, но не могла сколько-нибудь удовлетворительно объяснить интерференционных явлений, в которых световые лучи взаимно усиливаются или ослабляются в различных точках пространства. Одно из таких явлений открыл сам Ньютон: если прижать выпуклую линзу к плоской стеклянной поверхности, то в отраженном свете видна система концентрических колец вокруг точки соприкосновения. Ньютон видел трудность для своей теории света в этом явлении и должен был дополнительно предположить, что световые частицы распространяются какими-то «приступами». Такое объяснение выглядело не очень понятным.

Современник Ньютона Гюйгенс предложил волновую теорию света. Теория Гюйгенса объясняла не только преломление и отражение света, но и интерференцию: при сложении двух пучностей волн лучи взаимно усиливаются, при сложении пучности со впадиной ослабляются. В зависимости от разности фаз в различных точках происходит то или другое. Интерференцию волн легко наблюдать на поверхности воды: законы сложения всяких волн похожи друг на друга.

Несмотря на то, что теория Гюйгенса была явно более стройной, чем ньютоновская, она еще меньше устраивала физиков того времени. Дело здесь было не только в личном авторитете великого Ньютона: авторитет уже тогда не играл решающей роли в естественных науках. Главная трудность для теории Гюйгенса состояла, по мнению ученых, в том, что нельзя было придумать никакой вещественной среды, которая способна была бы передавать световые волны и никак не проявляла себя в других физических явлениях, например не оказывала никакого сопротивления движению Земли вокруг Солнца. В этом возражении сказалась характерная ограниченность научного мировоззрения, порожденного успехами ме-

ханики. Прошло еще два столетия после Ньютона, а физическая наука не могла представить себе никакого движения, не связанного непосредственно с перемещением вещества.

Полагали, что раз существуют колебания, то должно колебаться нечто осязаемое. Это осязаемое, которое упрямо не осязалось, назвали эфиром, и немало остроумия было потрачено на то, чтобы связать его с физической реальностью.

В начале XIX века волновая теория света окончательно восторжествовала над своей соперницей. Во-первых, был проведен ряд замечательных интерференционных опытов, которые никак не могли быть объяснены теорией Ньютона, даже с «приступами», во-вторых, была измерена скорость света в вещественной среде (в воде) и прямо показано, что она меньше, чем в пустом пространстве. По теории Ньютона, она должна была быть больше, только при этом условии объяснялось преломление корпускул света.

Наблюдая распространение света в кристаллах, физики установили, что световые колебания — поперечные, то есть происходят не в направлении луча. Упругие волны такого типа могут передаваться только в твердом теле, но никак не в жидкости или газе. Поэтому пришлось допустить, что эфир — твердое тело! Но это тело никак не мешало другим реальным телам свободно перемещаться в пространстве. Трудности механической теории эфира зашли так далеко, что в одном учебнике физики эфир был определен, как «существительное от глагола колебаться». Разумеется, обращение к грамматике никого не устроило. В такой тупик завело науку механистическое мировоззрение. Но во всей истории естественных наук еще не было примеров, чтобы одного лишь правильного мировоззрения было достаточно для построения правильной теории: истина всегда конкретна и не может быть угадана из общих рассуждений. Прогресс научного мировоззрения следует за развитием самой науки.

Разрешение загадки о природе световых колебаний пришло в оптику из другой области физики — учения об электромагнетизме. В начальной фазе развития теория электричества казалась весьма сходной с теорией тяготения. Так, закон взаимодействия точечных зарядов, экспериментально найденный Кулоном, весьма напоминал закон тяготения Ньютона: и там, и здесь обратная пропорциональность силы и квадрата расстояния, произведение масс в одном, произведение зарядов — в другом. Еще важнее, что оба закона были сформулированы в терминах дальнего действия: сила мгновенно передавалась на расстояние. Физическая реальность приписывалась взаимодействующим зарядам, или массам. Окружающее пространство никакими физическими свойствами не наделялось.

В дальнейшем были открыты явления электромагнетизма, то есть магнитного взаимодействия электрических токов.

Ток характеризуется не только величиной, но и направлением проводника, по которому он течет. В этом он существенно отличается от заряда или от массы, которые задаются только своей численной величиной. Поэтому закон взаимодействия токов во всяком случае не может выглядеть так просто, как закон Кулона; внешнее сходство сил электромагнитных с силами тяготения утрачивается. Но в своей первоначальной формулировке электродинамика магнитных сил все еще основывалась на дальнем действии.

Иначе рассматривал электромагнитные явления Фарадей, открывший электромагнитную индукцию. Фарадей полагал, что физической реальностью обладают само электромагнитное поле, окружающее заряды и токи. Явления индукции медленно-переменных токов, которые наблюдал Фарадей, не дают прямого доказательства самостоятельной реальности поля, или близкого действия. Тем не менее, как показало дальнейшее развитие физики, Фарадей стал на правильный путь.

Решающий шаг в этом направлении сделал Максвелл в шестидесятых годах прошлого века. Иногда утверждают, что Максвелл только облек в математическую форму воззрения Фарадея. Это неверно, так как Максвелл сделал основное для теории предположение об электромагнитной индукции в «пустом» пространстве, без всяких проводников. Согласно Максвеллу, переменное электрическое поле в пространстве индуцирует и переменное магнитное поле. Это учитывает полная система уравнений электромагнитного поля, предложенная Максвеллом. Только тогда из нее вытекает существование электромагнитных волн, способных распространяться в пространстве.

Именно предсказание электромагнитных волн было решающим успехом теории Максвелла, объяснившей свет, как электромагнитное явление. После этого волновая теория света уже не нуждалась ни в каком «эфире» для того, чтобы найти колеблющийся объект. Таким объектом оказалось электромагнитное поле. Тем самым пространство наделялось определенными физическими свойствами. Эти свойства нашли качественное выражение в уравнениях Максвелла, так же как в уравнениях Ньютона выразились свойства движения материальных частиц.

Признание электромагнитного поля реальным физическим объектом проходило далеко не безболезненно. Даже сам Максвелл вначале пытался строить механические модели «эфира», правда, не светоносного, а передающего электромагнитные силы на расстояние путем близкого действия. В старых книгах можно увидеть такую построенную (или только начерченную) Максвеллом модель с рычагами и зубчатыми

колесиками. Но в своем «Трактате об электричестве и магнетизме» Максвелл уже полностью отказался от механических моделей электромагнитного поля. Тем самым была признана физическая реальность поля, иначе говоря, наделено физическими свойствами пространство, которое до тех пор принадлежало целиком геометрии. Сама же геометрия и после Максвелла мыслилась как наука целиком умозрительная, никак с опытом не связанная.

Идеи Максвелла не сразу нашли признание на материке Европы. Только после опытов Герца, открывшего электромагнитные волны, теория Максвелла была признана повсеместно.

Прошло еще немного лет, и А. С. Попов осуществил радиопередачу. Так физическая теория была претворена в практику.

Пришло и другое подтверждение реальности электромагнитных волн как физического процесса. Речь идет о световом давлении. Согласно теории Максвелла, электромагнитное поле должно обладать энергией и импульсом, то есть количеством движения. Действительно, ведь электромагнитные волны распространяются не мгновенно; если какой-нибудь излучатель испустил волну, а приемник еще не успел принять ее, то где находится энергия, потраченная на излучение? Очевидно, она принадлежит именно полю. То же относится к другой сохраняющейся в механике величине — импульсу, или количеству движения. Падая на преграду, волна должна передать ей свой импульс, то есть действовать на нее с некоторой силой. Сила, распределенная по площади, есть не что иное, как давление. Это давление, предсказанное теорией, было измерено П. Н. Лебедевым. Оно оказалось как раз таким, как следовало из теории.

Таким образом, электромагнитное поле в пространстве обладает определенными механическими характеристиками. В этом смысле электродинамика может рассматриваться как механика электромагнитного поля. Но в одном отношении она существенно отличается от механики Ньютона, основанной на дальнем действии: в электродинамике есть только ближнедействие, распространяющееся с конечной скоростью.

Эта скорость распространения совпадает со скоростью света в пространстве, свободном от вещества, или, как до сих пор еще говорят, в «пустом» пространстве. На самом деле нельзя представить себе совсем «пустое» пространство, где нет никакой материи, то ли в форме частиц вещества, то ли в форме электромагнитного поля. Обе формы реальны в равной степени. Пространство без них само по себе есть фикция.

В предыдущем разделе показано, что свойства пространства и времени, сформулированные Ньютоном, вытекают из

его законов движения, точнее говоря, немислимы отдельно от этих законов. Естественно ожидать, что новые законы движения, характерные для электродинамики, в первую очередь близкодействие, существенно изменят физическое понимание пространства и времени по сравнению с ньютоновским. Так и оказалось на самом деле, но понадобился гений Эйнштейна, чтобы выявить это в полной мере.

Как всегда, развитие науки не шло прямыми путями. Пройдя через ряд трудностей, физическая теория привела Эйнштейна к необходимости пересмотра представлений о пространстве и времени, укоренившихся со времен Ньютона и представших в совсем новом свете на основе теории относительности. Мы рассмотрим теперь эти трудности и парадоксы.

ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА И ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ

Как известно, электромагнитные колебания отличаются длиной волны: самые длинные отвечают радиоволнам, затем идут инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и, наконец, гамма-лучи. Их взаимодействие с веществом существеннейшим образом различно, но есть одна фундаментальная величина, одинаковая для всех колебаний, — это скорость их распространения в пространстве, свободном от вещества, или, короче, в пустоте. Эта скорость равна приблизительно $300\,000$ км/сек.

И вот возникает следующий вопрос: относительно чего скорость электромагнитных волн равна как раз $300\,000$ км/сек? Ведь всякая скорость должна задаваться по отношению к какому-нибудь предмету, а не сама по себе. Например, скорость поезда относительно земли может равняться 60 км/час, а относительно встречного поезда — 110 км/час, если тот имел скорость 50 км/час по отношению к земле.

Относительная скорость двух тел, движущихся по земле, может иметь существеннейшее значение, если эти тела сталкиваются: очевидно, что столкновение в лоб и в хвост совсем не одно и то же, даже если скорости тел относительно земли в обоих случаях почти одинаковы.

Скорость имеет относительный характер не только у движущихся тел, но и у распространяющихся процессов. Так, скорость звука при нормальных условиях составляет 330 м/сек относительно покоящегося воздуха. Если излучатель звука и воздух в состоянии покоя, а приемник звука движется, то скорость звука относительно приемника определится по закону сложения скоростей. Если движется излучатель, то по отношению к воздуху скорость звука опять-таки будет 330 м/сек, а по отношению к излучателю окажется иной. К чему же относится скорость электромагнитных коле-

баний, или, короче, скорость света, входящая в уравнения электродинамики?

Пока считали, что свет распространяется в эфире, можно было говорить о скорости относительно эфира. Правда, эфир никак не проявлял себя при движении тел, поэтому отнесенные скорости света к эфиру еще не давало возможности отнести ее к каким-либо телам: ведь нельзя было определить абсолютно покоящееся или абсолютно движущееся тело. На движении тел эфир упорно не сказывался.

Однако оставалась следующая возможность: можно было сравнить скорость света относительно двух различных тел, движущихся друг по отношению к другу. Впервые это удалось осуществить Физо, измерившему скорость света относительно текущей воды.

В опыте Физо луч света раздваивался полупосеребренным зеркалом и попадал в две трубы, в которых вода текла в противоположных направлениях (рис. 1). Следовательно, в одной трубе скорость течения должна была складываться со скоростью света, а другой — вычитаться из нее. Поэтому свет затрачивал различное время на прохождение обеих труб (подобная задача предлагается в задачниках по алгебре для двух пароходов, идущих по течению и против). В покоящейся воде свет проходил обе трубы за одинаковое время, поэтому, после того как оба луча соединялись, они оказывались в одинаковой фазе колебаний и взаимно усиливали друг друга. Нетрудно было подобрать такую скорость течения, когда в текущей воде один луч опережал другой на полволны: тогда они взаимно погасались. Для этого нужны совсем не длинные трубы и такие скорости течения, которые можно получить от водопровода.

Опыт Физо дал положительный результат: скорость света в текущей воде отличалась от скорости в покоящейся воде. Правда, полного количественного совпадения с тем, что должно было получиться по простому закону сложения скоростей, не оказалось (то есть время прохождения труб на опыте не совсем такое, как выходит по расчету способом, применяемым в задаче о двух пароходах).

Важнее то, что опыт Физо отвечает не совсем на тот вопрос, который был поставлен вначале: ведь требовалось измерить скорость света в пустоте относительно двух различных движущихся тел, а не скорость света в двух различно движущихся телах. Скорость света в воде совсем не такая, как в пустоте, и далеко не имеет такого фундаментального значения для теории. Движение любого тела относительно воды сразу заметно, но как заметить движение тела относительно пустого пространства?

Если бы оказалось, что относительно одного тела свет распространяется в пустоте с одинаковой скоростью во

всех направлениях, а относительно другого скорость света в разных направлениях различна и определяется законом сложения скоростей, тогда можно было бы принять первое тело абсолютно покоящимся, а второе тело — абсолютно движущимся.

По направлению относительной скорости обоих тел скорость света была бы равна разности скорости света в пустоте и скорости движения второго тела, в обратном направлении, — равнялась бы их сумме.

Майкельсон задался целью поставить такой опыт. Правда, осуществить опыт так, как только что было сказано, очень трудно. Поэтому Майкельсон несколько видоизменил схему опыта, но оставил его в принципе совершенно тем же. Дело в том, что закон сложения скоростей распространяется не только на скорости, параллельные или антипараллельные друг другу. Скорости, образующие некоторый угол, складываются по правилу параллелограмма. Если скорости перпендикулярны, то их результирующая есть гипотенуза прямоугольника и вычисляется по теореме Пифагора. Этим и воспользовался Майкельсон.

Как и у Физо, в опыте Майкельсона луч света раздваивался полупосеребрянным зеркалом, но дальнейший ход был иным (рис. 2). Одна часть луча посылалась вдоль движения Земли, отражалась и возвращалась назад, против движения. Этой части требовалось известное время для распространения. Другая часть посылалась перпендикулярно движению Земли и тоже возвращалась назад после отражения. Здесь требовалось другое время для распространения: ведь скорость этого луча вычислялась не путем алгебраического сложения, а по теореме Пифагора, то есть по иной формуле. Разность обоих времен прохождения можно было подобрать такой, чтобы обе части луча сошлись в противоположных фазах и взаимно гасили друг друга. Чтобы проверить, влияет ли на гашение движение Земли, достаточно повернуть прибор на 45° : тогда обе части первоначального луча будут составлять

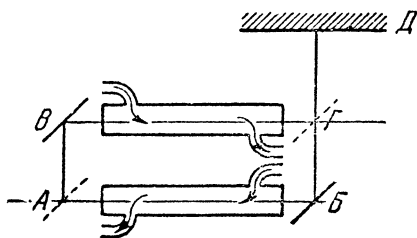


Рис. 1. Схема опыта Физо. Вода по трубам течет в противоположные стороны, как показано стрелками. Луч раздваивается полупосеребрянным зеркалом А. Часть, прошедшая А, идет по нижней трубе навстречу течению, до зеркала Б, посылающего его вверх. Отраженная часть направляется зеркалом В в верхнюю трубу, где оно идет по течению. Полупосеребрянное зеркало Г служит для того, чтобы лучи попали вместе на экран Д, где и наблюдается интерференция.

одинаковый угол с движением Земли и гашение не должно произойти.

В 1887 году Майкельсон и Морли произвели описанный опыт с необходимой точностью и получили определенно отрицательный результат. Скорость Земли не складывалась со скоростью света в пустоте (точнее, в воздухе, но разница ничтожна).

Таким образом, скорость света в пустоте не складывается ни с какой другой скоростью. Относительно любого тела она равна одной и той же величине — 300 000 км/сек.

В то время физики еще не понимали, что максвелловская электродинамика сделала эфир просто ненужным архаизмом. Именно эфиру попытались приписать отрицательный результат опыта Майкельсона: предположили, что, двигаясь «сквозь эфир», все тела, и в частности Земля, сокращаются как раз настолько, чтобы компенсировать эффект сложения скоростей. Учитывая это воображаемое сокращение, можно было вывести формулы сложения наблюдаемых скоростей, которые согласуются и с опытом

Майкельсона, и с опытом Физо. Эти формулы сохранились и в теории относительности, но приобрели в ней совсем другой смысл.

Необходимость иного толкования опыта Майкельсона выяснялась по мере развития электронной теории, то есть электродинамики элементарного заряда. Идея атомности электрического заряда существовала в физике задолго до того. Она непосредственно подтверждалась фарадеевскими законами электролиза, согласно которым заряд, прошедший через электролит, пропорционален химическому эквиваленту выделенного вещества. Но отсюда еще очень далеко до электронной теории, призванной объяснять все свойства элементарного заряда, в том числе его поведение, как механической частицы.

В этом пункте выявилась недостаточность ньютоновской

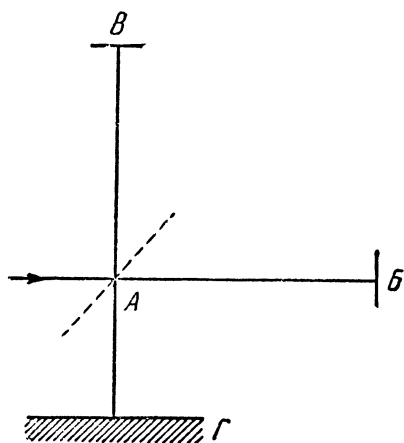


Рис. 2. Схема опыта Майкельсона. Полуперебрающее зеркало *A* разделяет световой луч. Одна часть идет вдоль движения Земли и отражается от *B*, другая — перпендикулярно движению Земли и отражается от *B*. С помощью *A* оба луча посылаются на экран *Г* для наблюдения интерференции. Если повернуть весь прибор на 45° , оба луча оказываются в одинаковом положении относительно направления движения Земли.

Майкельсона, и с опытом Физо. Эти формулы сохранились и в теории относительности, но приобрели в ней совсем другой смысл.

Необходимость иного толкования опыта Майкельсона выяснялась по мере развития электронной теории, то есть электродинамики элементарного заряда. Идея атомности электрического заряда существовала в физике задолго до того. Она непосредственно подтверждалась фарадеевскими законами электролиза, согласно которым заряд, прошедший через электролит, пропорционален химическому эквиваленту выделенного вещества. Но отсюда еще очень далеко до электронной теории, призванной объяснять все свойства элементарного заряда, в том числе его поведение, как механической частицы.

В этом пункте выявилась недостаточность ньютоновской

механики в применении к электронам. Потребовался полный пересмотр основ механики, включая и такие привычные определения, какие давались пространству и времени. Здесь имеются в виду не отвлеченные философские определения, а чисто физические, связанные со способом измерения определяемой величины: времени — по часам и длин в пространстве с помощью твердых масштабов. Никаких других определений физическая наука не знает.

Почему же ньютоновская механика не может быть в общем случае применима к движению элементарных электрических зарядов? Потому, что заряды действуют друг на друга не непосредственно, а через создаваемое ими электромагнитное поле. Это действие передается не мгновенно, а, как уже указывалось, с конечной скоростью. Механика элементарных зарядов должна относиться не к дальнему действию, а к близкодействию, иначе говоря, должна трактовать само поле как реальный объект, наравне с зарядами. Между тем механика Ньютона формулируется для точечных масс.

Правда, ее можно обобщить и на массы, распределенные в пространстве, как это делается в гидродинамике или теории упругости. В сплошной среде, жидкости, газе, в упругом твердом теле тоже существует волновое движение в виде звуковых волн. Но скорость звуковых волн, конечно, всегда гораздо меньше скорости света. Так, скорость звука в воздухе 330 м/сек., в стали около 5 000 м/сек. Скорость звука подчиняется обычному закону сложения скоростей, и это вполне естественно. Если, например, некоторый наблюдатель измерил скорость звука относительно земли в покоем воздухе, а другой наблюдатель — в движущемся воздухе, при ветре, то совершенно очевидно, что нет никаких оснований предполагать, что они должны были бы получить одинаковый результат. Звуковые волны сносятся ветром. Находиться в покоем или в движущемся воздухе совсем не означает одно и то же, как это известно каждому из повседневного опыта.

Но электромагнитные волны распространяются в пустоте, где нет никакого вещества. Здесь любого наблюдателя можно с одинаковым основанием считать и покоящимся и движущимся, если только он движется равномерно. Поэтому и нет причины ожидать, что один получит значение скорости света не такое, как другой. Как раз это и оказалось в опыте Майкельсона, но так как в то время повсеместно верили в существование эфира, результат Майкельсона был неожиданным.

Опыт Майкельсона доказал, что скорость света ни с какой другой не складывается. Поэтому нельзя применить ньютоновскую механику не только к зарядам, но и к создаваемому ими полю.

Электродинамика Максвелла есть в известном смысле механика электромагнитного поля. Что же мешает применить

механику Ньютона к электрону, а электродинамику — к полю? Легко видеть, что это приведет к противоречию. Пусть, например, два электрона движутся навстречу один другому, имея скорость, равную $\frac{3}{4}$ скорости света, относительно некоторого неподвижного наблюдателя. В основе ньютоновской механики лежит закон сложения скоростей. Согласно этому закону, относительная скорость обоих электронов должна была бы равняться $\frac{3}{2}$ от скорости света. Но это значит, что электроны столкнутся раньше, чем начнут взаимодействовать! Ведь взаимодействие между ними распространяется со скоростью света, которая с другими скоростями не складывается.

Можно придумать сколько угодно парадоксальных примеров, допустив, что скорость электронов подчиняется закону сложения, а скорость света не подчиняется ему. Невозможность ситуации, к которой приводят эти примеры, состоит в следующем. Допустим, что с каждым из летящих электронов в только что рассмотренном примере связан некоторый наблюдатель. Неподвижный наблюдатель может поддерживать связь с обоими летящими электронами, но каждый из летящих — только с неподвижным. Летящие электроны, как мы видели, не будут существовать друг для друга. Но в основе механики Ньютона лежит представление об относительности всякого движения: в принципе должно быть безразличным, какого из наблюдателей считать неподвижным, какого движущимся. Здесь же оказалось, что для неподвижного реальны два другие, а для движущихся — только один. Между тем физическая реальность должна быть одинакова для всех: два реальных предмета никак не могут превратиться в один только оттого, что их рассматривает некто, движущийся иным образом.

Поэтому последовательная электронная теория не может быть построена на основе механики Ньютона для электронов. Правильная система уравнений механики должна, как и электродинамика, основываться на близкодействии. В соответствии с тем, что было сказано о роли дальнего действия в ньютоновской механике для представлений о свойствах пространства и времени, следует ожидать, что переход к близкодействию существенно эти представления изменит. Эти новые понятия были отчетливо сформулированы Эйнштейном в 1905 году. Они известны под названием специального принципа относительности, который рассмотрен в следующем разделе.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Основное определение механического движения состоит в том, что оно относительно, то есть может задаваться только по отношению к некоторому телу или системе тел. Такое тело или система тел называется в механике си-

стемой отсчета; выбор ее до известной степени произволен. Между тем законы механики описывают реально совершающиеся события и в этом смысле не должны зависеть от произвола, связанного с выбором той или иной системы. Таким событием может быть, например, попадание пули в цель: ясно, что относительно чего бы ни задавалось движение, то есть траектория пули, она обязательно должна приводить к цели во всех системах отсчета, если она привела хотя бы в одной.

Пуля летит согласно законам механики, которыми определяется и правильный прицел. Следовательно, законы механики должны выполняться относительно любой системы отсчета, чтобы правильность прицела не зависела от произвольности выбора системы (разумеется, говоря о разных системах, мы имеем в виду один и тот же выстрел, но только рассматриваем его с земли, с поезда, самолета и т. д.).

Легко проверить, что законы Ньютона сохраняют свою форму при переходе от одной системы отсчета к другой, движущейся равномерно относительно нее. Основной, второй закон Ньютона гласит: сила равна массе, умноженной на ускорение тела. Сила зависит от расстояния между телами, а расстояние одинаково во всех системах отсчета, так как оно в механике Ньютона абсолютно.

Ускорение тела не может измениться, если к скорости тела прибавить любую постоянную скорость: согласно закону сложения скоростей, надо было при переходе от одной системы отсчета к другой сложить скорость тела с относительной скоростью систем. Таким образом, и в другой системе сила равна произведению массы на ускорение: второй закон Ньютона сохранил свою форму. Если бы вторая система двигалась ускоренно относительно первой, то к ускорению тела пришлось бы прибавить и ускорение второй системы. Этот случай мы оставляем пока в стороне.

Здесь мы пришли к принципу относительности для равномерно движущихся систем отсчета: законы механики формулируются одинаково относительно всех таких систем. Например, если уронить какой-нибудь предмет в поезде, идущем равномерно, траектория падения будет вертикальной прямой, в точности такой же, как если предмет уронить в покоящемся поезде. Но относительно земли траектория предмета, упавшего в поезде во время движения, совсем не будет прямой: ведь по мере падения предмет перемещается вместе с поездом. Следовательно, форма траектории зависит от выбора системы отсчета, а законы механики формулируются независимо от него.

Естественно предположить, что и законы электродинамики не должны зависеть от того, какой системой отсчета пользоваться при их написании, по крайней мере, если поле дей-

ствуется в пустом пространстве. Иначе говоря, надо распространить принцип относительности и на электромагнитное поле. Но как раз при этом оказывается, что применительно к полю принцип относительности не может иметь той формы, какую он имеет в ньютоновской механике. Ведь в механике он приводит к простому закону сложения скоростей, а в электродинамике, как мы видели, этот закон не имеет места. Применяя принцип относительности к электромагнитным явлениям надо заключить, что если скорость света в пустоте есть универсальная постоянная, то она не должна зависеть от выбора системы отсчета.

Опыт Майкельсона подтверждает правильность этого заключения.

Но, как мы уже видели, нельзя пользоваться одним принципом относительности для частиц и другим — для поля. Надо сформулировать единый принцип относительности, справедливый для того и другого. Для частиц, движущихся медленно, он по форме совпадает с тем, который принят в ньютоновской механике, и дает простой закон сложения скоростей (принцип относительности Галилея), а для больших скоростей принцип относительности должен давать более точный закон сложения, который оставляет скорость света в пустоте неизменной.

Фактически этот закон был известен до Эйнштейна. Он получался из несколько странной гипотезы о сокращении движущихся тел как раз настолько, чтобы опыт Майкельсона давал отрицательный результат. Но только Эйнштейн понял, что на самом деле здесь содержится обобщение галилеевского принципа относительности на электромагнитное поле.

Эйнштейн сумел также извлечь все выводы, которые получаются из этого обобщения, в первую очередь по отношению к свойствам пространства и времени.

Принцип относительности в применении к электромагнитному полю называется специальным, в отличие от общего, который относится к гравитационному полю и будет рассмотрен ниже. Мы изложим здесь некоторые выводы специального принципа относительности, не прибегая к математическим формулам.

Будем исходить из того, что во всех системах отсчета скорость света в пустоте равна одной и той же величине во всех направлениях. Пусть от некоторого источника исходит электромагнитный сигнал, назовем это начальным событием O (рис. 3). По оси абсцисс будем откладывать расстояние от источника, по оси ординат — время, прошедшее от начального события. Все, что случается в некоторой точке пространства в определенный момент времени, будет называться событием. Где на рисунке 3 может лежать точка, отвечающая второму событию, то есть приему сигнала, если отправлению

отвечает точка O , лежащая в начале координат? Ясно, что расстояние, пройденное сигналом, пропорционально прошедшему времени между отправлением и приемом. График пропорциональной зависимости есть прямая линия OO' . Для нее каждая точка абсциссы равна соответствующей ординате, умноженной на скорость света.

Пусть теперь те же два события, отправление и прием того же сигнала, рассматриваются в другой системе отсчета. Можно условиться снова отсчитывать расстояние и время от первого события: ведь начало координат выбирается только по соображениям удобства. Где же должно оказаться второе событие для другой системы отсчета? Так как скорость света во всех системах одинакова, второе событие непременно изобразится точкой, лежащей на той же прямой OO' . Но нет никаких оснований утверждать, что эта точка совпадает с изображением второго события в исходной системе отсчета. Соответственно этому прием сигнала показан для обеих систем разными точками A_1 и A_2 . Иначе говоря, промежуток времени и расстояние между двумя событиями различны в разных системах отсчета.

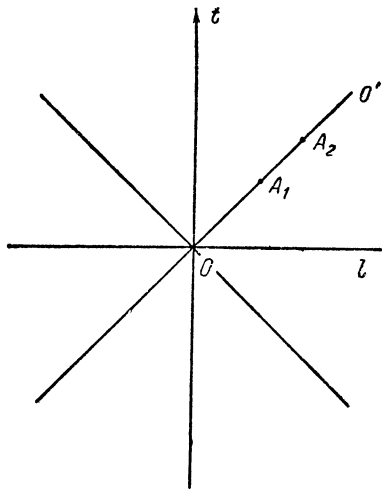


Рис. 3. Положение точек A_1 и A_2 на графике показывает промежутки времени и расстояния от излучателя до приемника в двух разных системах отсчета.

Почему мы не могли допустить, что они одинаковы, как этого требует ньютоновская механика? Потому, что отсюда немедленно последовал бы тот закон сложения скоростей, который противоречит опыту Майкельсона. Примем, что время одинаково; например, между отправлением и приемом сигнала в обеих системах прошла ровно одна секунда. Тогда в первой системе точка приема будет отстоять от точки отправления на 300 000 км, а во второй системе к этому расстоянию надо будет еще прибавить относительную скорость обеих систем, как показано на рисунке 4. Производя это сложение, мы, как видно из рисунка, приняли отрезки длины OA_1 и OA_2 равными (в O находится передатчик, в A_1 — приемник), то есть сделали допущение, что расстояние между приемником и передатчиком одинаково в обеих системах. Но тогда скорость сигнала во второй системе окажется численно равной отрезку $O'A_2$, который больше отрезка $OA_1 = 300\,000$ км. Тем самым получился обычный закон

сложения для скорости света, вопреки опыту и принципу относительности, распространенному на электромагнитные явления.

Заметим, что система, скрепленная с передатчиком, ничем не выделена: опыт Майкельсона производился и с веземным источником света и дал тот же результат. Скорость света одинакова во всех направлениях и равна одной и той же величине относительно любой системы.

Итак, мы показали, что время, протекшее между отправлением и прибытием сигнала, различно для разных систем отсчета;

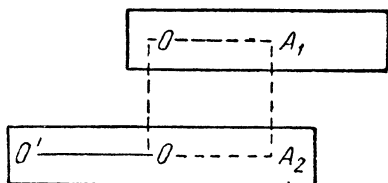


Рис. 4. Вывод закона сложения скоростей. Если отрезки OA_1 и $O'A$ равны и время от послыски до приема сигнала одинаково и равно одной секунде, то скорость света относительно верхней системы отсчета численно равна отрезку OA_1 , а относительно нижней системы — отрезку $O'A_2$.

тем самым постулат Ньютона о существовании единого мирового времени потерял силу. Каждая система отсчета характеризуется своим собственным временем в той же мере, как и координатами. Это утверждение противоречит нашему повседневному опыту. Но ведь заметное различие во времени появляется только при относительных скоростях систем, сравнимых со скоростью света, а повседневный опыт на такие большие скорости не распространяется.

Зато электроны могут двигаться с очень большими скоростями. Для них опытные факты находятся в полном согласии с принципом относительности Эйнштейна.

До сих пор мы рассматривали только такие события, как прием и отправление световых (вообще электромагнитных) сигналов в пустоте. Теперь рассмотрим произвольные два события, изображая их на графике, подобном рисунку 3 (рис. 5). Начало координат связано с первым событием. Пусть это будет самое простое, будничное «событие» — кто-то сел на стул. Столь же будничным окажется и второе «событие» — он встал со стула. В системе отсчета, связанной со стулом, второе событие произошло в той же точке пространства. Следовательно, на графике ему отвечает точка A_1 , лежащая на оси времен. Во всех других системах отсчета точка A_2 не может лежать на оси времен, потому что относительно этих систем стул успеет сместиться за время, шедшее между первым и вторым событиями. В зависимости от скорости другой системы отсчета второе событие может лежать на графике во всех точках, принадлежащих некоторой кривой A_1A_2 , проходящей через точку A_1 . Легко показать, что кри-

вая асимптотически¹ стремится к световым прямым, проведенным через начало. Действительно, пусть скорость другой системы отсчета очень близка к скорости света, тогда в этой системе расстояние между событиями должно быть соответственно близким к промежутку времени, умноженному на скорость света, а это отвечает уравнению световой прямой.

Скоростей, превосходящих скорость света, системы отсчета, как мы увидим, иметь не могут, поэтому любая кривая A_1A_2 должна асимптотически касаться световой прямой.

Пусть промежуток времени OA_1 равен одному часу. Тогда непосредственно из кривой видно, что существуют такие системы отсчета, в которых промежуток времени между теми же двумя событиями равняется двум часам, дню, году и т. д. Нет систем, в которых он был бы меньше часа. Но не следует думать, что есть такая система, относительно которой молодой человек, просидев один час на стуле, встал с него стариком. Пусть у сидевшего человека сердце совершало 72 удара в минуту, или за весь час 4320 ударов. Те же 4320 ударов произойдут и относительно любой другой системы — ведь каждый удар есть событие, а события есть объективные факты и одинаковы во всех системах отсчета. Ясно, что молодой человек совершенно одинаково постареет за то время, что его сердце сократилось равное число раз.

Таким образом, относительность времени вовсе не означает отказа от признания объективного хода событий, независимого от наблюдателя.

Но не следует думать, что описанное здесь увеличение времени есть какая-то фикция: тот наблюдатель, который в своей системе следил за сидящим год, действительно постареет на год! На первый взгляд может показаться, что здесь есть какое-то противоречие с идеей относительности движения: ведь с самого начала должно быть безразлично, какого наблюдателя считать неподвижным, какого — движущимся. На самом деле противоречия нет: каждый из наблюдателей, следя за пульсом другого, например с помощью радиосигна-

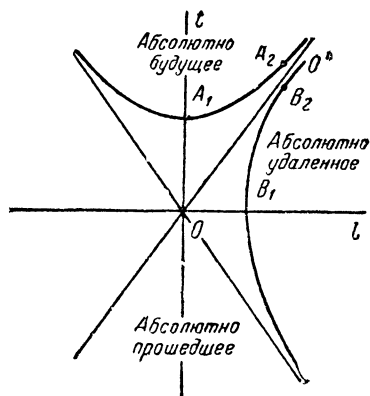


Рис. 5. Точки A_1 и A_2 показывают промежутки времени и расстояния между двумя событиями в двух разных системах отсчета. Точки B_1 и B_2 показывают то же, но для других двух событий. Начальное событие O одно и то же.

¹ Асимптота — прямая, касающаяся кривой на бесконечности.

лов, насчитает 4320 ударов за год. Каждый заключит, что другой прожил час за его год, и будет по-своему прав.

Так как наблюдатели движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, нет смысла спрашивать, кто из них постарел больше. Однако можно в принципе заставить второго наблюдателя повернуть назад для того, чтобы встретиться с первым. Назовем повернувшего назад наблюдателя космонавтом: естественно, что он, а не земной наблюдатель, возвращается. Теперь наблюдатели не могут считаться физически равноценными: ведь поворот связан с ускорением, которое почувствует только космонавт. Его, а не земного наблюдателя, специально для этого тренировали!

Не следует думать, что выигрыш во времени достигается космонавтом во время ускорения: можно повернуть назад, путешествуя и год, и десять лет с одной и той же скоростью. Но во втором случае выигрыш будет в 10 раз больше, а ускорение при повороте — одно и то же. Следовательно, разница времен только реализуется благодаря ускорению, а набирается во время полета.

Конечно, чтобы выигрыш был сколько-нибудь осязаемым, скорость космонавта должна быть очень близкой к скорости света, что пока очень далеко от возможностей техники¹. Но известны опытные факты, относящиеся к удлинению времени жизни — только не людей, а элементарных частиц.

В космических лучах присутствуют быстрые частицы, пи-мезоны, которые самопроизвольно распадаются на более легкие мю-мезоны и нейтральные частицы. Медленные пи-мезоны живут до распада в среднем две стомиллионные доли секунды: таково среднее время жизни пи-мезона в связанной с ним системе отсчета. Если бы это время было одинаковым относительно любой системы отсчета, то самые быстрые пи-мезоны, летящие почти со скоростью света, могли бы в среднем пролетать в воздухе расстояние около 6 м до своего распада. Фактически быстрые пи-мезоны пролетают в воздухе в среднем гораздо большие расстояния, так что относительно системы отсчета, связанной с Землей, время существенно удлиняется.

Рассмотрим теперь, что делается с твердым масштабом при движении. Для этого снова обратимся к рисунку 5. Совместим левый конец стержня с началом координат O , а правый конец поместим в точку B_1 , лежащую на оси абсцисс. Иначе говоря, мы приняли, что в системе отсчета, относительно которой стержень покоится, моменты времени для обоих концов стержня одинаковы. Это вполне естественно, так как концы покоятся друг относительно друга. Что же будет происходить во всех других системах отсчета?

¹ Так, Ю. А. Гагарин выиграл две миллионные доли секунды,

Будем по-прежнему считать, что левый конец находился в начальный момент времени, в начале координат любой системы отсчета. В тот же момент времени в системе, где стержень покоится, сделаем засечку правого конца B_1 на масштабе, который движется относительно данного. Все эти засечки будут лежать на кривой B_1B_2 , имеющей асимптотами те же световые прямые OO' , что и кривые A_1A_2 . Засечки левого и правого конца стержня будут не одновременными относительно движущихся систем отсчета, причем существуют такие системы, где вторая засечка произошла раньше первой, и такие, где она произошла позже. Но нет ни одной системы, где бы обе засечки произошли в одной и той же точке пространства, то есть где длина стержня равна нулю.

Пусть все стержни снабжены мерными делениями. Тогда, делая засечку, наблюдатель, неподвижный относительно стержня, заметит, что против его десятого деления находится, например, двадцатое или сотое деление движущегося стержня, смотря по положению точки B_1 , иначе говоря, для него движущийся масштаб сократится. В одном его делении будут два, или десять, или сто движущихся. Не обязательно говорить о делениях, нанесенных человеком, это могут быть природные деления, например постоянные кристаллической решетки одного и того же вещества.

Весь график на рисунке 5 можно разделить на три области. Между световыми прямыми выше начала находится область событий, абсолютно будущих по отношению к исходному событию O . Ни в какой системе отсчета событие, лежащее в этой области, не может оказаться более ранним, чем начальное. Действительно, ведь в этой области всегда найдется система отсчета, в которой оба события произошли в одной и той же точке пространства и, значит, могли быть связаны причинно, как посев и жатва. Но причина может только предшествовать следствию. Это отвечает форме кривых A_1A_2 , которые все уходят вверх.

Таким образом, относительность времени никак не может нарушить объективного характера причинности.

Ниже начала O между световыми прямыми лежит область абсолютно прошедшего. Кривые, аналогичные A_1A_2 , в этой области подходят к асимптотам снизу. Здесь можно повторить то, что говорилось о последовательности причины и следствия для области абсолютно будущего.

Правее и левее O между световыми прямыми лежит абсолютно удаленное. Здесь последовательность событий во времени зависит от выбора системы отсчета. Абсолютно удаленные события не могут быть связаны причинно. Ведь всегда существует система отсчета, в которой они произошли одновременно в разных точках пространства. Но мгновенное действие на расстояние невозможно, следовательно, одно собы-

тие никак не могло повлиять на другое. Пусть, например, нечто произошло на Солнце, а через минуту еще что-нибудь на Земле. Свет идет от Солнца 8 минут, так что первое событие никак не могло вызвать второе: никакое действие не успело бы достичь Земли за минуту. Таким образом, относительность времени не приводит ни к каким сверхъестественным следствиям, нарушающим порядок причинности.

Отказ об абсолютности времени отнюдь не означает признание его субъективности. Некогда абсолютным считали вертикальное направление в пространстве и на этом основании не хотели допускать, что Земля — шар. На рисунке 6 иллюстрировано средневековое рассуждение, «опровергающее» шарообразность Земли. Согласно этому рассуждению, антиподы не могли бы стоять на Земле вверх ногами, а должны были бы свалиться прямо в преисподнюю!

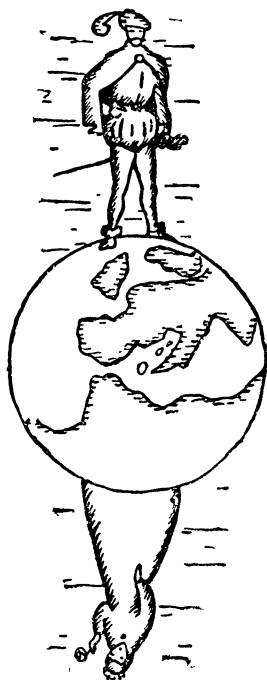


Рис. 6. Средневековое «опровержение» шарообразности Земли. Дама должна свалиться в преисподнюю.

На самом деле вертикальное направление в каждой точке земного шара направлено к его центру. Никто не может усомниться в объективности его определения в любом месте. Тем не менее в разных местах вертикальные направления образуют между собой угол, достигающий для антиподов до 180° .

То же относится к определению времени в теории относительности: оно вполне объективно в каждой системе отсчета, но относительно для разных систем.

Вообще следует помнить, что термин «теория относительности» имеет в виду не относительность человеческих знаний, как иногда думают профаны разных толков, а относительную равноценность систем отсчета, движущихся с постоянной скоростью друг относительно друга.

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В МИКРОМИРЕ

Мы уже видели, как второй закон Ньютона сохраняет свою форму, если перейти от одной системы отсчета к другой, движущейся равномерно относительно нее. При этом надо было использовать простой закон сложения скоростей, который, как нам уже известно, не применим к телам,

движущимся с большими скоростями, близкими к скорости света.

Законы механики для столь быстрых движений должны быть изменены в соответствии с тем законом сложения скоростей, который вытекает из теории относительности Эйнштейна.

При этом существенно изменяются выражения различных механических величин. Особенно важно выражение энергии в теории относительности. Оказывается, что даже покоящаяся частица обладает некоторой энергией, равной произведению величины ее массы на квадрат скорости света.

Этот результат сыграл решающую роль в физике ядерных превращений. Если некоторая частица распадается на две других, сумма масс которых меньше, чем масса исходной частицы, то избыток массы, умноженный на квадрат скорости света, равен кинетической энергии разлетающихся частиц. Существуют ядерные превращения, в которых избыток массы достигает 1% от всей массы. Это соответствует выделению энергии в миллиард килоджоулей на грамм вещества, в миллион раз большей, чем в самых теплотворных химических реакциях.

Соотношение между массой и энергией, установленное Эйнштейном, смело можно назвать важнейшей формулой физики XX века.

Энергия быстро движущейся частицы с массой, не равной нулю, стремится к бесконечности, когда скорость частицы стремится к скорости света. Следовательно, надо затратить бесконечную работу, чтобы разогнать такую частицу до скорости, равной скорости света. Иначе говоря, частица с массой, не равной нулю, не может двигаться с такой скоростью. Но есть частицы с массой, равной нулю: они могут двигаться только со скоростью света. Возможность существования частиц с нулевой массой следует из теории относительности; в ньютоновской механике определить такие частицы нельзя. Одной из частиц, не имеющей массы, является световой квант. Другая частица без массы — нейтрино, выделяющийся при бета-распаде атомных ядер. Природа кванта и нейтрино совершенно различна, общее между ними только то, что обе движутся со скоростью света.

Механика теории относительности применяется при расчете ускорителей, разгоняющих заряженные частицы до больших энергий. То, что эти ускорители работают, является наилучшим подтверждением правильности теории.

Мы уже говорили, что соотношение между массой и энергией имеет основное значение для ядерной физики. Другие формулы теории относительности очень важны для физики элементарных частиц, в первую очередь, основанных на квантовой теории, изложение которой не входит в нашу задачу.

Отметим только, что формулы квантовой теории в применении к элементарным частицам должны быть построены с учетом требований теории относительности. Оказывается, что это приводит к ряду важнейших выводов.

В дальнейшем мы будем называть «релятивистской» всякую теорию, согласующуюся с теорией относительности; это прилагательное общепринято.

Релятивистскую квантовую механику электрона построил в 1928 году П. Дирак. Чисто теоретическим путем он пришел к поразительному выводу: наряду с обычными отрицательно заряженными электронами должны существовать и положительно заряженные электроны. Встречаясь с отрицательным электроном, положительный электрон, как говорят, аннигилирует: заряды взаимно нейтрализуются, а энергия покоя переходит в энергию электромагнитного поля в виде двух квантов.

К работе Дирака сначала отнеслись несколько недоверчиво, но впоследствии положительный электрон или позитрон был открыт в космических лучах Андерсоном, причем все свойства позитрона совершенно правильно вытекали из уравнений, теоретически найденных Дираком. Так синтез квантовой теории и теории относительности привел к самому поразительному факту предвидения, какой знает история науки.

Частицы, способные аннигилировать, называются античастицами по отношению к тем, с которыми они аннигилируют. Позитрон является античастицей электрона. В настоящее время открыт также антипротон и антинейтрон и некоторые другие античастицы.

Открытие античастиц заставляет несколько иначе понимать, что такое «пустое пространство». Ограничиваясь электродинамикой и оставляя ядерные частицы в стороне, можно утверждать, что так называемый «вакуум» есть только состояние электронно-позитронно-электромагнитного поля, обладающее наименьшей возможной энергией. Подводя к этому полю энергию, можно заставить рождаться либо кванты, либо электрон-позитронные пары, либо то и другое. Иначе говоря, пространство, свободное от вещества, есть на самом деле особое состояние материи. Вот как далеко ушла современная физика от абстрактного, геометрического пространства!

В связи с физикой элементарных частиц выяснилось одно удивительное свойство пространства, о котором никто до того не подозревал. Речь идет о так называемой право-левой асимметрии. Асимметрию такого рода легко может почувствовать каждый, пытаясь надеть правый ботинок на левую ногу. В органическом мире, к которому принадлежит все живое, и человек в том числе, различие между правым и левым видно повсеместно, начиная с молекул и кончая всем живым существом в целом. Известно, как правая половина нашего тела отличается от левой. Но прежде предполагали, что эта

асимметрия присуща только живому миру и обязана каким-то случайностям зарождения жизни на Земле.

В 1956 году Ли и Янг, анализируя некоторые закономерности распада элементарных частиц, смогли доказать, что некоторая, хотя и чрезвычайно слабая, асимметрия имеет место и в неорганической природе. Она проявляется чаще всего в бета-распаде, при котором нейтрон распадается на протон, электрон и нейтральную частицу — нейтрино. Асимметрия названа нами слабой, потому что силы, вызывающие бета-распад, в 100 000 миллиардов раз слабее, чем те силы, которые удерживают нейтрон и протон в ядре.

Является ли эта асимметрия бета-распадных сил свойством самих частиц или пространства, окружающего их? Быть может, такой вопрос и не имеет глубокого смысла: ведь частицы нельзя мыслить вне пространства, а пространство — отдельно от частиц. «Пустое» пространство есть только особое состояние поля, из которого частицы могут рождаться при подводе энергии. «Пустое» пространство заполнено, образно выражаясь, неродившимися душами (можно надеяться, что читатель не поймет буквально это сравнение, заимствованное из «Синей птицы»!). Поэтому важно, что асимметрия бета-сил существует, а чему приписать ее, частицам или пространству, вопрос терминологический.

Тем не менее Л. Д. Ландау, а также сами Ли и Янг, заметили, что есть такая форма асимметрии, которую естественно приписать именно частицам, если допустить, что электрон и позитрон и вообще частица и ее античастица относятся друг к другу, как правая рука к левой (или как левая к правой!). Согласно идее Ландау, мы видим в зеркале не себя, а антисебя, все то, что разыгрывается за зеркалом, происходит по законам антимира, где протоны заряжены отрицательно, а электроны — положительно.

Если принять это допущение, то асимметрию бета-сил следует приписать тому, что ядра нашего мира состоят из протонов и нейтронов, а не из антипротонов и антинейтронов в некоей области вселенной, заполненной антивеществом, как наша область — веществом. Тогда правильнее считать, что асимметричными свойствами обладают частицы, а свойства пространства одинаковы по отношению к веществу и антивеществу. Но возможно также, что нет областей мира, заполненных антивеществом, и есть какая-то глубокая, но не известная нам закономерность в том, что именно протоны заряжены положительно, а электроны — отрицательно, тогда как их двойники, антипротоны и позитроны, существуют эфемерно, только до своей аннигиляции. Если есть такая закономерность, то асимметрия бета-распада связана с какой-то асимметрией самого пространства.

Может показаться, что право-левая асимметрия не имеет отношения к теории относительности. Фактически, однако, глубокий анализ ситуации стал возможным в этом случае только благодаря релятивистской теории элементарных частиц, которая основана на квантовой механике и на теории относительности.

Было бы очень интересно узнать, нет ли какой-нибудь связи между асимметрией бета-распада и той асимметрией, которую мы наблюдаем в живой природе. Пока мы не имеем никаких оснований для указания такой связи, так как все известные до сих пор жизненные явления обязаны силам типа химических, которые в конечном счете имеют электрическую природу. Электрические силы в молекулах гораздо слабее ядерных, но еще в миллиарды раз больше бета-сил. Хотя мы еще не все знаем о природе жизни и можем только гадать о том, как она возникла, крайне сомнительно, чтобы бета-превращения сыграли здесь какую-нибудь роль.

Применение теории относительности к законам микромира не везде принесло такие триумфальные результаты, как открытие античастиц. Важнейшая, ключевая проблема современной физики — вопрос о строении элементарных частиц до сих пор недоступен изощреннейшему теоретическому анализу. Трудность здесь состоит в том, что не удастся ни учесть требования теории относительности, ни обойти их.

Эта проблема возникла еще в классической электронной теории. Там она выглядела следующим образом. Допустим сначала, что электрон — точечный, то есть не имеет размеров. Тогда его собственное поле в той точке, где он находится, по закону Кулона бесконечно велико: ведь оно обратно пропорционально квадрату расстояния до электрона. Там, где расстояние равно нулю, сила бесконечна. Электрон не может отличить собственное поле от внешнего, так что его энергия в собственном поле должна быть бесконечно велика. Согласно теории относительности, масса равна энергии, деленной на квадрат скорости света: если бесконечно велика энергия, такой же должна быть и масса. Но масса электрона хорошо известна, она, разумеется, вовсе не бесконечна. Значит, теория относительности не допускает точечного электрона.

К сожалению, она не допускает и протяженного электрона! Действительно, одноименные заряды не могут сами по себе находиться в некоторой конечной области пространства: электростатическое расталкивание непременно рассеет их. Значит, приходится поверить в существование каких-то сил, сдерживающих заряды внутри электрона. Тогда, если внешнее электромагнитное поле достигнет одного края электрона и сдвинет находящиеся там заряды, противоположный край тоже должен мгновенно сдвинуться благодаря этим гипотетическим силам. Иначе говоря, внутри протяженного электрона

возмущение передается мгновенно, тогда как согласно теории относительности невозможно распространение никаких взаимодействий со скоростью большей, чем скорость света.

Надо сказать, что описанная здесь трудность имела для классической электронной теории скорее методическое значение. Дело в том, что эта внутренняя противоречивость теории наступала только при сближении с электроном на расстоянии порядка одной десятитриллионной доли сантиметра. Фактически же квантовые эффекты начинают сказываться решающим образом на расстояниях в 100 раз больших. Поэтому трудность лежит вне области применения классической электронной теории.

С этой трудностью пришлось бороться квантовой теории поля. В результате весьма остроумных приемов удалось сформулировать квантовую электродинамику так, что бесконечности из нее хотя и не исчезли полностью, но оказались целиком в стороне от наблюдаемых эффектов. Иначе говоря, на любой вопрос, связанный с реальным или хотя бы мыслимым экспериментом сколь угодно большой точности, теория дает конечный и однозначный ответ.

Этот остроумный прием состоит в том, что наблюдаемая масса электрона представляется в виде разности какой-то внутренней массы, присущей самому электрону, и массы электромагнитного происхождения. Последняя оказывается бесконечной. Но можно считать бесконечной и собственную массу, притом как раз такой, что разность конечна и равна наблюдаемой величине массы. После этого спокойно можно считать электрон точечным.

Доказано, что этот прием будет проходить в квантовой электродинамике всегда. Такое положение теории нельзя не признать по меньшей мере удовлетворительным.

Совсем иначе обстоит дело в квантовой теории ядерных сил, которые в сотни раз больше электромагнитных.

Хотя существуют варианты теории, где вычитательный прием тоже удастся, расчеты каждый раз оказываются грубо неточными. Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчук доказали, что точных результатов получить невозможно. Следовательно, теорию никак нельзя будет сравнивать с опытом. Здесь положение совершенно неудовлетворительное.

Есть много предположений о том, как пойдет развитие будущей теории. Ряд теоретиков считает, что мы просто еще не умеем описывать процессы, происходящие с точечными частицами. Правильной будет такая теория, в которой бесконечные величины нынешней теории не будут появляться совсем. Если эти надежды оправдаются, наши представления о пространстве и времени, основанные на специальной теории относительности, не будут нуждаться в уточнениях.

Но есть и другая точка зрения, согласно которой свойства

пространства и времени претерпевают существеннейшие изменения где-то в области порядка радиуса действия ядерных сил (около десятитриллионной доли сантиметра), или, быть может, в области еще в тысячу раз меньшей, где бета-силы сравниваются с ядерными. Если это так, то специальная теория относительности окажется не точной, какой ее полагают в настоящее время, а приближенной. Сильные отклонения от нее будут наступать где-то в малой окрестности элементарных частиц. Теперь обычно имеют в виду это изменение свойств пространства, говоря о неточечных частицах. Надо заметить, что в этом радикальном направлении пока получено еще гораздо меньше результатов, чем в указанном выше более умеренном, пытающемся сохранить точечные частицы и теорию относительности в ее современном виде.

Значительную помощь теории здесь мог бы оказать опыт. Для этого нужно ускорить частицы до энергий, приблизительно в тысячу раз больших, чем те, которые получаются в современных синхрофазотронах.

СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ И СИЛЫ ИНЕРЦИИ

В этом и в дальнейших разделах мы будем говорить об эйнштейновской теории тяготения, которая иначе называется общей теорией относительности. Эйнштейн сумел построить ее не на основании каких-либо опытных фактов, противоречивших классической, то есть ньютоновской, теории тяготения, а только исходя из глубокого анализа уже известного. При этом теория Эйнштейна предсказала некоторые новые эффекты, существование которых было подтверждено впоследствии.

Необходимость новой теории тяготения стала очевидной после создания специальной теории относительности. Ведь ньютоновский закон тяготения был основан на представлении о далекодействующих силах, мгновенно передающихся на расстояние. Все здание специальной теории относительности было бы лишено основы, если бы существовала скорость передачи взаимодействий, бóльшая, чем скорость света.

В одном из своих выступлений Эйнштейн сказал, что исследователю необходимо уметь удивляться. Именно одно из удивительных свойств ньютоновского закона тяготения и послужило ключом к новому закону, который не только уточнил и обобщил старый, но и необычайно углубил наши знания о пространстве и времени.

Как известно, сила тяготения пропорциональна произведению масс притягивающихся частиц. Почему же в выражение силы взаимодействия входит такая величина, как масса? Ведь это та же масса, которая определяет ускорение, сообщаемое телу любой приложенной к нему силой, будь то элек-

трическая, магнитная, упругая сила или даже сила трения. Иначе говоря, это инертная масса тела, от которой не зависит ни одна сила взаимодействия, кроме силы тяготения, которая каким-то таинственным образом связана с инерцией.

Проще всего эта связь выражается в том обстоятельстве, что в пустоте все тела падают с одинаковым ускорением, что показал еще Галилей. Это очень легко вывести и из закона Ньютона. Сила равна произведению массы на ускорение, но по закону тяготения она же равна произведению массы тела на массу Земли, деленному на квадрат расстояния до центра Земли (с постоянным для всех тел коэффициентом пропорциональности). Сокращая обе части равенства, выражающего этот закон, на массу тела, видим, что ускорение от нее не зависит.

В течение столетий до открытия Галилея считалось, что чем тяжелее тело, тем быстрее оно падает. Отчасти в этом сказалось неумение учесть сопротивление воздуха, но в гораздо большей степени давил авторитет Аристотеля, который в средние века был непререкаем.

В эпоху Галилея происходил решительный поворот к опытному познанию природы. На опыте Галилей сумел убедиться, что достаточно тяжелые тела, на движении которых не сказывается воздух, задерживающий падение, падают на землю за одно и то же время. По преданию, Галилей бросал для проверки кирпичи с наклонной Пизанской башни и убедился в том, что один кирпич и два кирпича, связанные вместе, одновременно достигают земли, если их одновременно уронить.

Между тем, если передвигать два связанных кирпича, например мускульной силой, то ускорение при одной и той же силе будет вдвое меньше у двух кирпичей.

Интересно проследить за рассуждением Ньютона, который вывел из опытов Галилея свой закон тяготения. Этот вывод одновременно явился проверкой правильности ньютоновских законов динамики. Представим себе достаточно высокую гору, на вершине которой уже не сказывается сопротивление воздуха. Пусть с вершины горы производится выстрел в горизонтальном направлении. Ядро полетит вперед, но одновременно будет падать на землю и достигнет земли на некотором расстоянии от подножия горы (рис. 7). Если увеличить начальную скорость ядра, оно упадет дальше, может достигнуть и противоположной точки земного шара. Наконец, при достаточно большой начальной скорости ядро совсем не упадет на землю, а вернется к вершине горы и станет тем, что мы теперь называем искусственным спутником Земли.

Легко сосчитать, какова должна быть при этом начальная скорость ядра. Двигаясь по круговой траектории, оно в каждый момент времени обладает центростремительным ускоре-

нием, равным квадрату скорости, деленному на радиус. Это ускорение и следует приравнять ускорению свободно падающего тела. Последнее известно, и радиус Земли тоже известен, откуда оказывается, что необходимая скорость равна 8 км/сек (первая космическая скорость). Но у Земли есть и естественный спутник — Луна. Расстояние до Луны и ее скорость на орбите тоже известны. Считая, что Луна также свободно падает на Землю, но не достигает Земли, так как успевает обернуться за счет своей скорости, легко сосчитать ускорение свободного падения на Землю на расстоянии, равном радиусу лунной орбиты.

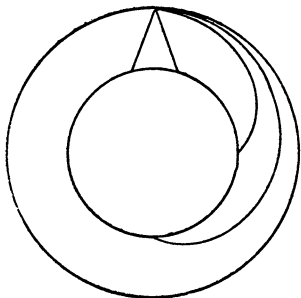


Рис. 7. Искусственный спутник Земли по Ньютону. Высота горы сильно преувеличена в масштабе.

Это ускорение во столько же раз меньше ускорения на земной поверхности, во сколько раз квадрат радиуса Земли меньше квадрата радиуса орбиты Луны, откуда Ньютон и вывел свой закон тяготения.

При этом выводе использован результат Галилея: сравнивалось ускорение Луны и маленького искусственного спутника. Иначе говоря,

Ньютон предположил, что любой спутник, помещенный на орбиту Луны, будет обладать тем же ускорением свободного падения, что и Луна, и наоборот.

Далее Ньютон, очевидно, уже знал, что ускорение пропорционально действующей силе, то есть сформулировал второй закон в общем виде, безотносительно к силе тяготения. В закон тяготения входит и масса Земли, как того требует третий закон Ньютона, то есть равенство сил действия и противодействия: сила притяжения выражается одинаково через массы обоих тел.

То, что инертная масса входит в силу взаимодействия, всегда несколько удивляло физиков, но состояние научной мысли в целом не позволяло до Эйнштейна извлечь отсюда естественные выводы о природе тяготения.

Исходным для Эйнштейна послужило то обстоятельство, что существуют силы иной природы, не обязанные взаимодействию, которые тоже не зависят от массы тела. Речь идет о силах инерции. Эти силы известны каждому из повседневной жизни, пожалуй, не хуже, чем сила тяжести. Все, ездившие в поезде или в автомобиле, прекрасно знают, что в момент остановки ощущается толчок, тем более сильный, чем резче было торможение. Легко понять, чему обязан этот толчок: вагон тормозится, а пассажир продолжает свое движение по инерции, пока сам не сумеет затормозиться каким-ни-

будь способом, например ударившись о переднюю стенку или ухватившись за что-нибудь рукой. Таким образом, вагон испытывает ускорение относительно земли, а пассажир, стремясь продолжить свое движение, тем самым ускоряется относительно вагона.

Это ускорение имеет кинетическую природу, и поэтому очевидно, что оно не зависит от массы ускоряемого тела. Если подвесить к потолку вагона два груза разной массы на одинаковых нитях, то углы отклонения обоих грузов от верти-

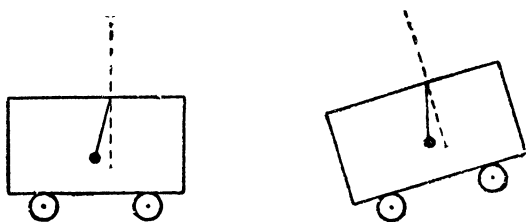


Рис. 8. Ускоряемый вагон (слева) и наклонный вагон. Грузы образуют одинаковые углы с направлением, перпендикулярным полу вагона. Если за окнами темно, пассажир не может отличить один случай от другого.

кали при торможении вагона окажутся равными. По второму закону Ньютона сила равна ускорению тела, умноженному на его массу. Следовательно, отклонения обоих тел можно приписать силе, пропорциональной их массе: ведь их ускорения равны.

Представим себе, что вагон движется с постоянным ускорением. Тогда оба груза так и будут висеть отклоненными на постоянный угол от вертикали и пассажиры вынуждены будут держаться за что-нибудь, чтобы не съехать со скамеек. То же самое произойдет при движении вагона по наклонной плоскости, когда сила тяжести изменит направление относительно пола вагона (рис. 8). Но в случае ускоренного движения вагона мы говорим, что на предметы в вагоне действует сила инерции, так как их ускорение относительно вагона обязано движению этих предметов по инерции относительно земли.

Всегда ли пассажиры сумеют отличить равномерное движение под уклон от ускоренного движения по горизонтали? Если за окнами будет темно, то никакого способа чтобы различить силы не обнаружится. Сила притяжения к земле и сила инерции проявят себя, как физически тождественные.

Те, кто летал на самолете, помнят ощущение, испытанное при развороте; кажется, что земля наклонилась, а самолет продолжает лететь, сохраняя плоскость крыльев горизонталь-

ной. Почему так происходит? Когда самолет поворачивает, пассажир по инерции продолжает двигаться прямо (вернее, стремится продолжать, но вынужден следовать за самолетом из-за реакции стенок самолета и кресла). Всякое отклонение от прямолинейного движения приводит к ускорению. Следовательно, и здесь возникает сила инерции, называемая в этом случае центробежной силой. Так как ускорения всех тел в самолете равны, центробежная сила пропорциональна массам тел, подобно силе инерции в тормозящемся вагоне.

Центробежная сила действует в горизонтальной плоскости, сила тяжести — в вертикальной, так что их равнодействующая наклонна. Самолет наклоняет плоскость крыльев как раз настолько, чтобы она стала перпендикулярной к этой равнодействующей, тем самым как бы применяясь к новому направлению тяжести. Пассажир чувствует, что тяжесть продолжает прижимать его к сидению кресла, и не испытывает никакой силы, стремящейся стащить его с кресла в сторону. Поэтому он и видит землю наклонившейся: вертикальным мы привыкли считать направление именно силы тяжести.

Правда, общая сила здесь больше, чем при движении по прямой, потому что равнодействующая сил направлена по гипотенузе треугольника, которая всегда превосходит катеты. Поэтому при развороте пассажир испытывает неприятное чувство. Утверждая выше, что сила тяжести и сила инерции совершенно тождественны по своему действию, мы предполагали, что в любом случае, при наклоне или ускорении, равнодействующие оказались одинаковой величины. То же относится и к наклонному движению вагона.

Итак, в каждой малой области пространства, в вагоне, в самолете, невозможно отличить силу инерции от силы тяжести, если не смотреть на окружающие тела. Эйнштейн сумел так сформулировать закон тяготения, что движение в поле тяжести оказалось всегда равносильным свободному движению по инерции. Иначе говоря, никакой силы тяжести в ньютоновском понимании у Эйнштейна нет: камень падает на землю и планеты движутся вокруг Солнца, повинувшись только инерции.

На первый взгляд может показаться, что это какой-то невозможный парадокс: ведь свободное движение прямолинейно и равномерно, между тем планеты движутся по эллипсам, камень падает ускоренно. Но к чему относится понятие свободного движения? Очевидно, к пространству, в котором нет никакой материи, к пустому пространству. Чем дальше от Солнца, тем, действительно, меньше его влияние, тем больше радиус орбит и, так сказать, прямее движение планет. Чем дальше от Земли, тем меньше ускорение падающего на нее тела.

Поэтому свободное движение в такой форме, как оно по-

нимается у Ньютона, есть только некоторая идеализация истинного положения вещей. Ведь на самом деле пространства, совсем лишенного материи, не существует. Нет оснований утверждать, что реальные свойства пространства и времени (сокращенно: мира) вблизи материальных тел совершенно такие же, как очень далеко от них.

Свойства пространства изучает геометрия. Таким образом, закон тяготения Эйнштейна устанавливает связь между геометрией мира и находящейся в нем материей. Тем самым постулаты геометрии находят свое обоснование в законах физики.

Следует ожидать, что истинная геометрия мира не может быть евклидовой. Ведь свойства евклидова пространства одинаковы везде, а реальные свойства мира различны вблизи и в дали от тяготеющих масс.

Для того чтобы объяснить, как это может получиться, надо дать некоторое понятие о неевклидовой геометрии.

ГЕОМЕТРИЯ ИСКРИВЛЕННОГО МИРА И ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ

Э тот заголовок не следует воспринимать, как пародийный, заимствованный из «Алисы в стране чудес». Мы будем говорить о вполне реальной кривизне нашего реально существующего мира.

Здесь математика несколько предвосхитила физику: к счастью для Эйнштейна, он нашел для формулировки своего закона тяготения уже готовый математический аппарат, начало которого заложено в работах великого казанского математика Н. И. Лобачевского.

В геометрии Евклида есть пятый постулат: через каждую точку, находящуюся вне прямой, можно провести одну, и только одну, прямую, параллельную данной. Этот постулат никак не вытекает из первых четырех. В книге Евклида сначала доказаны все теоремы, которые можно доказать, не прибегая к пятому постулату, а потом уже идет сам этот постулат.

Пятый постулат пытались вывести из предыдущих в течение двух тысячелетий, потратив на это не меньше остроумия, чем на задачу о квадратуре круга, и с тем же результатом. К началу XIX века стало почти очевидным, что пятый постулат или любое равносильное ему утверждение (например, что сумма углов треугольника равна 180°) не вытекают из первых четырех постулатов.

Один из основателей современной математики, Гаусс, даже измерял во время геодезической съемки сумму углов треугольника, образованного тремя вершинами гор. Но, разумеется, с точностью до ошибок измерения она оказалась равной двум прямым углам. Гаусс начал развивать также си-

стему геометрии, не основанной на пятом постулате, исходя из допущения, что можно провести через точку целый пучок прямых, не пересекающихся с данной прямой. Но Гаусс нигде не напечатал этого, вполне справедливо опасаясь насмешек современников.

Насколько обоснованными были опасения, видно по тому, как были приняты работы Лобачевского, который впервые решился опубликовать результаты, относившиеся к неевклидовой геометрии. Лобачевский пошел в этих исследованиях гораздо дальше Гаусса и, что в науке самое главное при установлении приоритета, первым напечатал свои труды. Поэтому развитая в них система геометрии вполне справедливо носит его имя. Следует еще отметить, что почти одновременно с Лобачевским и независимо от него к тем же результатам пришел Больяй. Когда приходит время появления великих идей, они могут зародиться сразу у многих.

Ход рассуждений Лобачевского был довольно своеобразным. Он полагал, что если система неевклидовой геометрии нигде не придет к внутреннему противоречию при своем развитии, то это и будет доказательством независимости пятого постулата от первых четырех. Надо ли говорить, что такого противоречия нигде не обнаружилось.

На это можно было бы возразить, что систему всех утверждений неевклидовой геометрии нельзя довести до конца и всегда остается какой-то, пусть и очень маленький, шанс на то, что противоречие найдется в дальнейшем. Но в отношении геометрии Лобачевского ситуация сложилась иначе. Оказалось, что существует некая плоская кривая, при вращении которой вокруг ее асимптоты возникает поверхность, во всех отношениях сходная с плоскостью в геометрии Лобачевского (рис. 9). Поэтому неевклидова геометрия точно в такой же мере свободна от внутренних противоречий, как и геометрия Евклида.

Сказанное нуждается в пояснении. Прежде всего, что следует понимать под геометрией на кривой поверхности? Что заменяет на поверхности основной элемент геометрии — прямую линию? На это очень легко ответить, взяв в руки глобус. Между любыми двумя точками земного шара можно проложить кратчайший путь по поверхности Земли. Ясно, что это будет не истинная прямая линия, которую нанести на сферу невозможно, а дуга большого круга — обстоятельство, весьма важное для навигации. Такие линии кратчайших расстояний на кривой поверхности носят название геодезических. Их можно определить не только для сферы, но, по крайней мере на малом участке, для любой гладкой поверхности, в том числе и для той поверхности, на которой выполняется геометрия Лобачевского. Именно если геодезические линии на этой поверхности назвать «прямыми» и рассматривать их це-

ликом в рамках геометрии Евклида, то для них будут справедливы как раз положения геометрии Лобачевского. Например, в точке всегда существует целый пучок таких «прямых», реально не пересекающихся с данной «прямой». Если убрать кавычки, то все теоремы Лобачевского буквально переносятся на эту поверхность, что и доказывает их внутреннюю непротиворечивость.

Еще более простую модель плоскости Лобачевского видит наблюдатель, стоящий на равнине. Надо только условно считать линию горизонта бесконечно удаленной и все прямые на местности, не пересекшиеся до горизонта, называть «параллельными». Если взять теперь две прямые дороги, уходящие в различные точки горизонта в обе стороны и нигде в видимой части равнины не пересекающиеся, то ясно, что около каждой дороги существует целый пучок направлений прямых, не пересекающихся с другой дорогой (рис. 9).

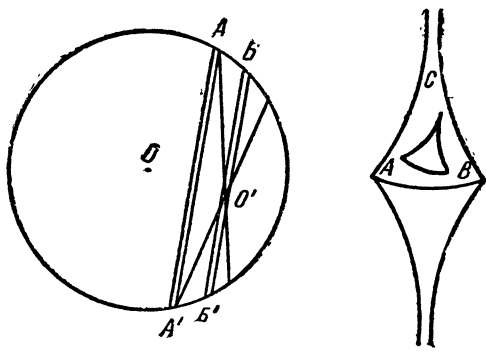


Рис. 9. Две модели плоскости Лобачевского. Слева наблюдатель, стоящий в точке O на равнине, видит две дороги: AA' и BB' . Линию горизонта он принимает бесконечно удаленной. Тогда из точки O' можно провести целый пучок прямых, нигде не пересекающих AA' в поле зрения O . Справа — тело вращения, на поверхности которого действует геометрия Лобачевского. Сумма углов треугольника ABC меньше 180° .

Другой пример неевклидовой геометрии получается на сферической поверхности. Здесь роль прямых играют дуги большого круга. Две такие дуги всегда пересекаются, следовательно, в этой геометрии совсем нет параллельных. Это несовместимо с первыми четырьмя постулатами Евклида, согласно которым параллельные прямые могут существовать (пятый постулат относится к их единственности). На самом деле, дуги большого круга пересекаются в двух точках сферы, например, меридианы — в обоих полюсах, а евклидовские прямые — только в одной точке. Поэтому геометрия на сфере еще больше отличается от евклидовской, чем геометрия Лобачевского. Она называется геометрией Риманна, идеи которого вплотную подвели геометров к созданию математического аппарата теории относительности.

До сих пор мы говорили о кривых поверхностях, на которых роль прямых играют геодезические линии. Труднее

вообразить искривленное пространство, а еще труднее — искривленный мир. Ведь у мира четыре измерения: три пространственных и время. Даже плоский, неискривленный мир специальной теории относительности трудно представить себе наглядно. Тем более трудно оперировать понятиями искривленного четырехмерного мира. Но математикам удалось создать особую систему алгебраических обозначений, которая позволяет работать в области неевклидовой геометрии произвольного числа измерений, не прибегая к наглядным образам. В этих обозначениях и формулируется закон тяготения Эйнштейна.

Рассматривая кривую поверхность в нашем пространстве трех измерений, мы как бы смотрим на нее извне и поэтому заранее не сомневаемся в ее кривизне. Но на свой мир мы не можем смотреть извне. Как же убедиться в его искривлении?

Для этого удобно на некоторое время принять точку зрения воображаемого двумерного, но разумного существа, живущего на кривой поверхности и не обладающего никакими органами чувств для восприятия третьего измерения. Такое существо будет называть геодезические линии на своей поверхности прямыми, с самого начала без всяких кавычек, так как других прямых для него не существует. Сможет ли оно узнать, что его поверхность кривая, а не плоская?

Поначалу, пока ему будет доступна только небольшая часть поверхности, близкая к соприкасающейся плоскости, существо будет руководствоваться постулатами Евклида и не заподозрит, что истинная геометрия его «мира» иная. Но со временем доступная часть поверхности возрастет. Измеряя углы достаточно большого треугольника, можно будет узнать, чему равна их сумма. Если она окажется меньше двух прямых, разумное существо заключит, что на его поверхности выполняется геометрия Лобачевского, если больше — геометрия Риманна. Чем длиннее стороны треугольника, тем сильнее отклонение от евклидовой геометрии. Мерой длины для сторон треугольника явится при этом радиус кривизны поверхности, так что существо может не только убедиться, что его мир искривлен, но и узнать, каков радиус кривизны. В случае сферической поверхности существо узнает также, что его мир имеет конечные размеры, несмотря на то, что нигде не заметно его границ.

На сфере кривизна будет одного знака — положительная и притом постоянная. На другой выпуклой поверхности кривизна тоже окажется положительной, но меняющейся от места к месту. Так, на яйцевидной поверхности сумма углов треугольника больше вблизи острого конца, чем вблизи тупого, при равной длине сторон. На той поверхности вращения, где выполняются постулаты геометрии Лобачевского

(см. выше), кривизна отрицательная, но везде постоянная. Поэтому такая поверхность называется псевдосферой (то есть лжесферой). Существуют, конечно, и поверхности с переменной отрицательной кривизной.

Итак, не выходя в пространство большего числа измерений, можно узнать об искривлении нашего мира.

Для этого надо принять, что свободное в смысле теории относительности движение происходит по геодезическим линиям мира. В пределе, на бесконечном расстоянии от тяготеющих масс, эти линии переходят в прямые, в соответствии с первым законом Ньютона. Закон тяготения Эйнштейна обобщает этот «закон инерции» для движения на произвольном расстоянии от притягивающих масс. Но зато ни второй, ни третий законы Ньютона, по крайней мере в применении к полю тяжести, не нужны: если все движения свободные, то понятие силы совершенно излишне.

Таким образом, закон тяготения Эйнштейна в его математической форме устанавливает связь между положением и движением гравитирующих масс, с одной стороны, и геометрией мира — с другой. Этой связи достаточно, чтобы найти и свойства кривизны мира, и движение самих масс.

Задача существенно упрощается, если движение гравитирующих масс известно заранее, например, имеется одна большая покоящаяся масса в центре, как масса Солнца в планетной системе. Геометрия мира, окружающего такую массу, сравнительно легко определяется из уравнений Эйнштейна. Тогда, пренебрегая влиянием других тел на движение центрального, можно найти их траектории как геодезические линии в пространстве с заданными свойствами.

Решение этой задачи доводится до конца. В первом приближении получается, конечно, ньютоновское движение по эллипсам. О поправках будет сказано ниже.

Может показаться очень странным, как это геодезические линии — эллипсы? Ведь даже на глаз видно, что они совсем не самые прямые.

На самом деле, однако, речь идет не о кривизне трехмерного пространства, а о кривизне четырехмерного мира. В мире траектория планеты вовсе не замыкается, как в его проекции на трехмерное пространство, которую воспринимаем мы. Положение планеты в данный момент времени отделено от ее положения после еще одного оборота «дорогой длиной в год». Но эта дорога расположена во времени.

Чтобы перейти от временной меры к пространственной, достаточно, как учит теория относительности, умножить промежуток времени на скорость света. Можно перейти и от пространственной меры к временной, поделив на скорость света. В этой мере расстояние от Солнца до Земли равно 8 минутам. По сравнению с годом 8 минут — это довольно небольшой отрезок времени.

Если попытаться условно изобразить траекторию Земли в мире, откладывая время по вертикальной оси (рис. 10), а расстояние — по горизонтальной, то получится винтовая линия, у которой шаг в 32 000 раз больше радиуса витка. Пусть кто-нибудь попробует на глаз отличить эту линию от прямой! Но следует помнить, что рисунок 10 — только иллюстрация,

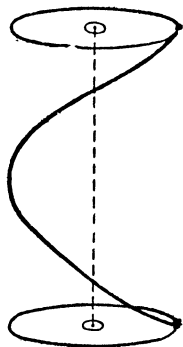


Рис. 10. «Дорога длиной в год»,

Перпендикулярно плоскости земной орбиты отложено расстояние, равное скорости света, умноженной на число секунд в году. Винтовая линия представляет путь Земли в четырехмерном мире. Он мало отклоняется от прямой линии,

так как на самом деле время ведь не откладывается ни по какому направлению в пространстве.

Решение уравнений гравитации, относящееся к движению планет вокруг Солнца, в некотором смысле только уточняет результаты ньютоновской механики, но не содержит качественно новых элементов. Однако есть и другие решения, не имеющие классических аналогов. Очень интересно решение для пространства, не содержащего ни вещества, ни электромагнитного поля. В ньютоновской механике гравитационное поле в таком пространстве оказалось бы тождественно равным нулю. Иначе обстоит дело в общей теории относительности (уже говорилось, что так называется эйнштейновская теория гравитационного поля, распространяющая принцип относительности на ускоренные системы отсчета). Здесь имеются решения в виде бегущих волн, очень напоминающих электромагнитные волны в пустоте.

Так как гравитационные волны безусловно действуют на частицы вещества, нет никаких оснований сомневаться в том, что эти волны отвечают физической реальности. Мы имеем в виду столь малые частицы, собственным гравитационным полем которых можно пренебречь; они служат только для индикации гравитационных волн.

Итак, гравитационные волны материальны, как и электромагнитные волны. Но гравитационные волны есть волны кривизны пространства (точнее, мира). Отсюда видно, что в общей теории относительности нельзя провести границу между собственно материей и пространством — временем. Распространенное определение пространства и времени как неких условий существования материи, таким образом, не вполне соответствует современному состоянию физической науки.

Само определение мира отдельно от движения материи согласно общей теории относительности невозможно. Любая система отсчета во всех своих точках как-то определяется

движущейся в этих точках материей, причем по движению материи определяется и переменная кривизна мира. Повторяем, что система уравнений гравитации полная, то есть содержит столько же уравнений, сколько и неизвестных. Ее решение дает и движение материи, и геометрические свойства пространства.

Гравитационные волны способны излучаться, подобно электромагнитным. Например, их излучают двойные звезды, вращаясь вокруг общего центра тяжести, или Земля, вращаясь вокруг Солнца. Но потеря энергии на такое излучение ничтожно мала и не сказывается заметно на движении масс.

Пока мы не располагаем аппаратурой достаточно сильной, чтобы излучать заметную энергию в виде гравитационных волн, или достаточно чувствительной, чтобы их регистрировать. Но можно надеяться, что со временем такая аппаратура будет создана. Принимая гравитационные волны, проходящие из вселенной, можно будет получить ценнейшие астрономические сведения: ведь эти волны совершенно не задерживаются веществом, в отличие от волн электромагнитных. По этой же причине гравитационные волны смогут когда-нибудь стать важным средством связи.

Хотя обнаружение и применение гравитационных волн — дело будущего, но теоретическое их изучение имеет принципиальный интерес. Из уравнений гравитаций следует, что гравитационные взаимодействия распространяются с той же скоростью, что и электромагнитные, иначе говоря, что гравитация передается тоже путем близкодействия. Таким образом, никакая синхронизация всех часов в мире с помощью гравитационных сигналов физически невозможна. Противоречие между специальной теорией относительности и законом тяготения тем самым снимается.

Иногда распространение гравитационных волн изучают на основе квантовой теории, подобно тому, как в квантовой электродинамике рассматривается распространение электромагнитных волн. В последнем случае из уравнений следует, что электромагнитное поле реализуется в виде элементарных частиц с нулевой массой: световых квантов, или фотонов. Совершенно аналогично получаются и гравитационные кванты, или гравитоны. Вычисления, которые приводят к ним, вполне «корректны», то есть не противоречат известным законам физики. Тем не менее, квантование гравитационного поля имеет чисто академический интерес. Так, гравитоны, испускаемые Землей при ее вращении вокруг Солнца, составляют долю от одного эрга, выражаемую единицей с 34 нулями! Эту энергию надо сравнить с кинетической энергией Земли на орбите, имеющей порядок единицы с 40 нулями эргов. Испуская гравитон, Земля теряет от своей энергии долю, представляемую обратной величиной от единицы с 74 нулями.

Между тем электрон в атоме, испуская световой квант, сразу отдает всю энергию, которую он способен отдать. С. этим связана необходимость квантования электромагнитного поля в применении к атомным процессам. Но никому не придет в голову нелепая мысль квантовать электромагнитное поле в динамомашине: здесь уже кванты окажутся ничтожно малыми по сравнению с полной энергией вращения ротора. Тем бессмысленнее операция квантования гравитационного поля.

Некоторые горе-популяризаторы, говоря о гравитонах, полагают, что они этим объясняют природу гравитационного поля. На самом деле они с большим успехом могли бы объяснять работу динамомашин с помощью квантов электромагнитного поля. Правда, их статьи тогда бы никто не печатал. Приходится пожалеть, что та же судьба не постигла гравитонные «теории» тяготения.

Иногда спрашивают, какую роль гравитация играет в атоме. Нетрудно сосчитать, что сила гравитационного притяжения между протоном и электроном в единицу с 40 нулями раз меньше, чем сила электростатического притяжения. Поэтому в атоме гравитация заведомо не существенна.

Высказываются также надежды, что теория гравитационного поля поможет преодолеть те трудности в физике элементарных частиц, о которых говорилось выше. Насколько это оправдается, покажет будущее. Но современное состояние науки заставляет считать эту возможность крайне сомнительной.

Есть, однако, предположения, которые можно начисто отвергнуть уже теперь: речь идет о так называемой антигравитации. В одной недавно вышедшей «популярной» книге самолеты XXI века спокойно летают с помощью антигравитации (этот не вполне грамотный оборот речи употреблен здесь в соответствии с общим духом книги). Если бы авторы книги снабдили свои самолеты вечными двигателями, это вызвало бы только смех: по традиции вечный двигатель — вещь одиозная. Но если бы существовала материя, которая отталкивалась, а не притягивалась силами тяжести, ничего бы не стоило построить такой двигатель.

В ускоряющемся вагоне антигравитирующее вещество двигалось бы не в ту сторону, куда смещаются обычные предметы, а в противоположную. Трудно представить себе больший абсурд!

Мы намеренно коснулись всех этих праздных вопросов, чтобы помочь читателю самому разобраться в том, что встречается в «популярной» литературе.

В следующем, заключительном разделе будут рассмотрены те следствия общей теории относительности, которые могут сравниваться с опытными фактами.

СЛЕДСТВИЯ ИЗ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Планеты в солнечной системе притягиваются не только к Солнцу, но и одна к другой. Из-за этого орбиты не являются точными эллипсами, а несколько, как говорят астрономы, возмущаются. Возмущения проявляются в том, что медленно изменяются элементы орбит, то есть их наклоны к общей плоскости всей системы, отношения больших полуосей к малым, положения перигелиев в пространстве.

Расчетом этих эффектов занимается небесная механика. Теория сходится с наблюдениями для всех орбит, кроме орбиты Меркурия. Его перигелий поворачивается на $43''$ в столетие — быстрее, чем это могут произвести возмущения всех планет солнечной системы. Часть подобной орбиты изображена на обложке, но поворот перигелия сильно преувеличен.

Оказывается, что если рассчитывать движение планет по законам общей теории относительности, то для Меркурия как раз и получается этот поворот на $43''$. Для других планет эффект значительно меньше. Находясь на большем расстоянии от Солнца, они движутся медленнее и на них слабее сказываются эффекты теории относительности: ведь в формулы всегда входит отношение скорости тела к скорости света. Кроме того, орбита Меркурия достаточно вытянута, чтобы можно было с должной точностью определить положение перигелия в пространстве. Орбита Венеры, на которой тоже возможно было бы подметить эффект, гораздо круглее, так что труднее указать, где находится ее перигелий.

Совпадение данных для Меркурия является поразительным фактом предвидения.

Мы уже говорили, что роль прямых линий в поле тяжести играют геодезические линии. По ним распространяются и световые лучи. Но только следует помнить, что это линии в четырехмерном мире, так что их проекции на трехмерное пространство отнюдь не должны совпадать с проекциями четырехмерных геодезических линий, по которым движутся планеты. У света эти проекции оказываются гораздо прямее.

Тем не менее, они не совершенно прямые. Проходя вблизи края Солнца, луч света отдаленной звезды несколько загибается (рис. 11). Угол между асимптотами к траектории луча составляет $1,75''$. На небесный свод это отклонение проектируется в направлении от Солнца, как видно из рисунка.

В обычных условиях нельзя наблюдать извуду, находящуюся на небе так близко от Солнца: ее свет потонет в солнечных лучах. Но во время полного солнечного затмения звезды вблизи Солнца удастся сфотографировать. После этого надо сравнить снимок со снимком той же части неба, когда Солнце находилось далеко от нее, и определить смещения звезд по величине и по направлению.

Наблюдения дают, в общем, удовлетворительное согласие с теорией. Неточности измерений при этом таковы, что на большее пока нельзя было рассчитывать.

Очень любопытно отметить, что отклонение света вблизи Солнца было предсказано полтора столетия назад из совсем других соображений. Закон тяготения Ньютона просто применили к частицам, имеющим скорость света, — ведь тогда еще многие верили, что свет переносится частицами.

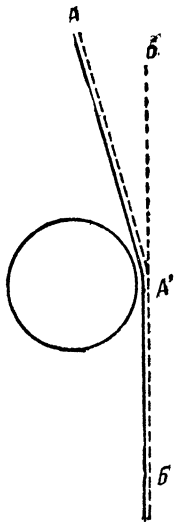


Рис. 11. Угол между асимптотами AA' и BB' равен $1,75''$. Кривая, имеющая эти асимптоты, — путь светового луча мимо Солнца.

Потом волновая теория света завоевала общее признание и об этом предсказании просто забыли. Оно дает эффект вдвое меньший, чем теория относительности, тогда как современные наблюдения скорее тянут в большую сторону от величины $1,75''$.

Не следует особенно удивляться тому, что результат, полученный так давно, отличается от современной теории только вдвое: в формулу для отклонения световых лучей с необходимостью должны входить одни и те же величины, по какой бы теории его ни рассчитывать. Эти величины — масса Солнца, радиус Солнца, скорость света и постоянная тяготения. Из них единственным способом составляется выражение угла так, чтобы сантиметр, грамм и секунда взаимно сократились в размерностях и осталась безразмерная величина радианной меры угла. Но остается неопределенным числовой коэффициент впереди — это и есть та самая двойка, на которую результат общей теории относительности исправляет прежний.

Надо еще добавить, что из факта отклонения световых лучей в поле тяжести никак не следует, что свет распространяется в виде частиц. Световые лучи в данном случае надо понимать как линии, перпендикулярные к фронту световых волн. У этих линий — свойство геодезических.

Как уже указывалось, вблизи гравитирующих тел меняются свойства и пространства, и времени. Часы, помещенные в поле тяжести, должны идти несколько медленнее, чем вдали от гравитирующего тела.

Произвести такой опыт непосредственно с часами затруднительно. Однако эталоны времени хранятся в природе и помимо часов, сделанных человеком, — в атомах. Частоты колебаний световых волн, испускаемых атомом, и являются

одним из таких эталонов. Атом в поле тяжести звезды испускает свет меньшей частоты, чем в данной спектральной линии такой же атом на Земле. Все линии в спектре звезды сместятся к красному концу. Этот эффект действительно наблюдается.

Недавно его удалось воспроизвести и в земных условиях, удаляя излучатели на какие-нибудь 10 м по высоте. Излучали в этом случае не атомы, а атомные ядра. Возможность столь точного измерения частоты ядерных излучений открывается благодаря особому свойству атомов в кристаллах, замеченному Мессбауэром, которое заключается в следующем.

Изолированное ядро, излучая квант, принимает на себя импульс отдачи, подобно орудью при выстреле. При этом оно получает и часть энергии кванта, уносящего таким образом не весь запас энергии, имевшийся в ядре. До излучения ядро как-то двигалось вместе с атомом (частицы вещества всегда движутся). Квант, вылетевший под углом к направлению движения ядра, уносит не точно такую же энергию в результате отдачи, как испущенный строго по направлению движения. Так как атомы движутся беспорядочно, энергия испущенных квантов несколько размазывается. Согласно квантовой теории, энергия кванта пропорциональна его частоте. Поэтому вещество в газообразном состоянии испускает кванты ядерных излучений не строго одинаковой частоты. Это полностью маскирует смещение частоты, обязанное гравитации. Но Мессбауэр открыл, что, если ядро принадлежит атому в кристалле, находящемуся при низкой температуре, то отдачу воспринимает на себя весь кристалл, как целое. При этом энергия отдачи неизмеримо меньше, чем у отдельного атома. Частота испущенного кванта выдерживается с точностью до одной стомиллиардной доли. Этого достаточно, чтобы заметить гравитационный эффект. Недавно такой опыт удалось осуществить, и результаты полностью совпали с предсказанием теории.

Но, как заметил Я. Б. Зельдович, смещение частоты, пропорциональное первой степени энергии гравитационного поля, еще недостаточно для того, чтобы служить подтверждением общей теории относительности. Это смещение можно предсказать и на основе специальной теории относительности. Рассмотрим атомное ядро, способное к испусканию света. Оно обладает помимо своей собственной энергии также и той энергией, которая должна испуститься. Такое ядро называется возбужденным. Следовательно, оно имеет и большую массу, чем ядро после испускания. Поднимая возбужденное ядро на некоторую высоту, надо совершить большую работу, чем при поднятии возбужденного ядра. Сравнивая энергии квантов, испущенных двумя возбужденными ядрами на разных

высотах, надо вычесть эту работу из энергии кванта, испущенного на бóльшей высоте.

Таким образом, гравитационное смещение частоты следует из закона сохранения энергии и пропорциональности между массой и энергией. Чтобы получить прямое количественное подтверждение общей теории относительности, надо было бы заметить часть эффекта, квадратично зависящую от энергии гравитационного поля. Но это находится далеко вне пределов современных возможностей.

Другие явления, то есть вращение перигелия Меркурия и отклонение световых лучей вблизи Солнца, дают настоящее подтверждение эйнштейновской теории тяготения. Но и здесь наблюдаются только малые поправки к дорелятивистской физике. Между тем есть весьма важная область естествознания, где общая теория относительности играет решающую роль. Речь идет о космологии, или строении мира, как целого.

Космология волновала человеческий ум с незапамятных времен. Мы не будем касаться космологических построений, имеющих только историко-культурный интерес, а рассмотрим ту основную проблему, которую выдвигало учение о мире, как целом, базируясь на ньютоновской теории тяготения.

Считая пространство евклидовским, надо было безоговорочно признать его бесконечным. Иначе пришлось бы воздвигнуть какие-то границы вселенной, что со времен Возрождения уже никого из ученых не устраивало. Естественно было полагать, что бесконечная вселенная везде содержит вещество, либо пришлось бы признать, что материя образует только отдельный остров во вселенной, в остальных частях пустой.

В лучшем случае удавалось расположить эти острова так, что средняя плотность массы во вселенной оказывалась равной нулю (это никак не подтверждается современными астрономическими данными).

Для чего же нужно было строить модель вселенной, в которой плотность материи равнялась нулю? Потому что гипотеза о конечной средней плотности не вяжется с ньютоновским законом тяготения. Сила тяжести от далеких звезд убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до них, а общее число звезд растет прямо пропорционально занимаемому объему, то есть кубу расстояния. Отсюда получается бесконечная величина общей силы тяготения, действующей на любое тело во вселенной. На фоне этой силы Земля не почувствовала бы притяжения Солнца, а знаменитое ньютоновское яблоко (если оно существовало) — притяжения Земли. Поэтому теоретические занятия космологией на основе закона тяготения Ньютона, без учета общей теории относительности, относятся к числу попыток с заведомо негодными средствами.

Решение уравнений гравитации Эйнштейна, представляющее реальный интерес для космологии, впервые получил ленинградский математик и механик А. А. Фридман в 1923 году. Он первый обратил внимание на то, что свойства пространства, содержащего материю, никак не могут быть статическими, то есть должны зависеть от времени. Физически это просто понять: ведь одни только силы тяготения не могут удержать массы в покое, а движущиеся массы производят нестатическое поле тяготения.

Решение Фридмана является простейшим из возможных. Оно основано на предположении, что массы совершенно равномерно распределены в пространстве. Тогда плотность их зависит от времени, так же как и геометрические свойства пространства. Оказывается, что есть типы решений, различные по следующим признакам:

1. Плотность возрастает или убывает со временем.

2. Общий объем пространства бесконечен или конечен.

Последнее может быть установлено из одного простого соотношения между скоростью расширения материи (для расширяющихся типов) и плотностью материи.

Решение Фридмана применил к космологии Ж. Леметр. Исходным для него послужило то обстоятельство, что галактики, удаленные от нашей, убегают от нее тем быстрее, чем дальше они находятся. В настоящее время известны объекты, скорости которых относительно нашей Галактики не менее половины от скорости света! Разбегание галактик Леметр сопоставил с нестатичностью фридманского решения, которое тоже отвечает равномерному расширению материи.

Неоспоренно, что главным достоинством фридманского решения является простота исходных предположений и выводов. Поэтому его легче всего сравнивать с астрономическими наблюдениями. В течение 30 лет после появления работы Леметра данные астрономов много раз говорили и за и против его космологической модели. И до сего дня эта простая модель не имеет ни опровержения, ни решающего подтверждения, и неизвестно, насколько правильно она отражает, хотя бы с качественной стороны, историю и строение вселенной.

Одно из предположений, принятых в решении Фридмана, по-видимому, выполняется хорошо: расширение происходит равномерно. По крайней мере нет никаких указаний на то, что скорость разбегания галактик как-либо отклоняется от пропорциональности их расстоянию от нас. Это свидетельствует в пользу равномерного закона расширения.

Труднее проверить другое предположение — о равномерном распределении материи в пространстве: по этому вопросу имеются разноречивые данные.

Если принять, что плотность в среднем постоянна по

всему пространству (усреднять ее надо по областям, содержащим еще очень много галактик), то наиболее достоверным в настоящее время является допущение, что в каждом кубическом сантиметре вещества вселенной в среднем находится масса, равная одной стотысячной от массы протона. Это значение плотности является в некотором отношении критическим: при больших плотностях объем вселенной оказывается конечным, при меньших — бесконечным. Разумеется, нынешняя величина плотности еще слишком мало подтверждена, чтобы просто считать ее равной критической.

Поэтому сейчас нельзя сделать окончательный выбор между конечной или бесконечной вселенной. Любые другие соображения, кроме данных естественных наук, в этом вопросе по меньшей мере бесполезны.

Часто приходится слышать такое возражение: если вселенная конечна, то что находится за ее пределами? Разумеется, никаких пределов конечная вселенная не имеет и не может иметь.

В таком же смысле поверхность шара нигде не имеет границы в двух измерениях: человек, несомненно, обошел всю Землю, но никогда не попадал на край света. Между тем, наибольшее расстояние по земной поверхности составляет 20 000 км. Конечная модель вселенной тоже означает, что в нашем мире есть некое наибольшее возможное физическое расстояние. Большую цифру легко написать на бумаге, но более отдаленных от нас материальных объектов не будет (рис. 12). И не следует думать, что за этими объектами пойдет сплошная пустота: пустое пространство — математическая фикция. В пространстве, определенном физически, то есть связанном с движущейся материей, кривизна может оказаться подобной кривизне шара. Это будет равносильно конечности всего объема пространства, но никакой границы, типа небесных сфер в представлениях древних, отсюда не последует.

В некоторых книгах выдвигается совсем странное соображение: конечной-де может оказаться только доступная нам часть вселенной, а не вся вселенная в целом. Развитие науки не дает нам никаких указаний на то, что человеческое познание имеет какие-то естественные пределы. Нет оснований считать, что наука не даст нам возможности охватить всю вселенную, даже если она окажется бесконечной. Утверждать, что изучению подлежит только какая-то часть вселенной, значит не понимать существа космологической проблемы. Выдвигаются даже возражения, связанные с частной жизнью Леметра. Отвечать на них не стоит...

Решение Фридмана обладает одной интересной особенностью. Оно не позволяет определить бесконечно большого промежутка времени в прошлом — для расходящейся модели и

в будущем — для сходящейся. Иначе говоря, плотность материи в формулах Фридмана обращается в бесконечность, если подставить в них момент времени, отдаленный от нашего приблизительно десятью миллиардами лет. На это тоже нельзя возразить: а что было раньше? Свойства модели мира, положенной в основу решения, таковы, что большего промежутка времени физически не существует. Похож или не похож мир на эту модель в действительности, можно ответить только изучая реальный мир, а не исходя из предвзятых соображений.

В настоящее время известно еще слишком мало, чтобы делать окончательные выводы. Но эти выводы, несомненно, будут сделаны, и для этого не потребуются астрономических сроков. «Дальнობойность» современных телескопов, оптических и улавливающих радиоволны, уже не слишком далека от той цифры, которая фигурирует сейчас в качестве вероятного радиуса кривизны мира (напоминаем, что кривизной может обладать и бесконечный мир, в котором действует геометрия Лобачевского).

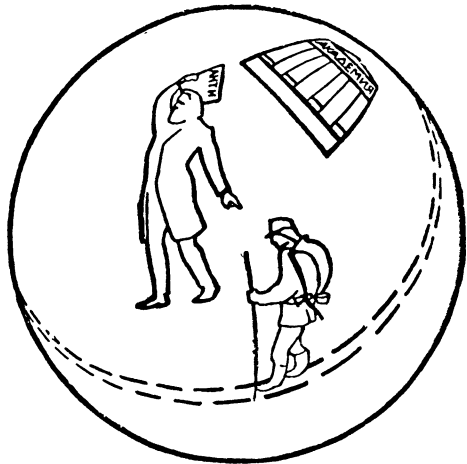


Рис. 12. Воображаемый двумерный путешественник, живущий на сфере, обошел ее кругом и вернулся к своим следам. Двумерный мудрец из академии предал его анафеме.

Недавно Б. М. Понтекорво и Я. А. Смородинский в Дубне высказали любопытные соображения по поводу значения средней плотности материи во вселенной. Есть основания полагать, что материя, доведенная до температуры 10 миллиардов градусов, очень интенсивно испускает нейтрино. Возможно, что такие температуры достигаются в недрах некоторых звезд. Нейтрино обладает способностью свободно проходить через вещество. Выходя из горячих звезд, он незримо продолжает присутствовать в пространстве, влияя через свое гравитационное действие на геометрию мира. Таким образом, детальное изучение космологии поможет установить, сколько нейтрино присутствуют в мире. Надо отметить, что здесь существует некоторый верхний предел: слишком большие плотности очень укоротили бы максимально возможный возраст вселенной, а он не может быть, очевидно, меньше возраста Земли. Последний же составляет, по данным о радиоактивности горных пород, около 4 миллиардов лет.

Большой принципиальный интерес для космологии представляет следующая проблема: все ли решения уравнений гравитации допускают только некоторый максимальный промежуток времени в прошлое или в будущее? Е. М. Лифшицу и И. М. Халатникову в Институте физических проблем АН СССР удалось построить достаточно общие решения, в которых время может быть продолжено неограниченно. Космологический смысл полученного ими результата пока трудно выяснить. Ведь несравненно менее общее решение Фридмана до сих пор не полностью «переварено» космологией. Новое решение открывает перед наукой очень широкие возможности, и сейчас нельзя сказать, в какой форме оно будет применено.

Таково нынешнее состояние науки о мире как целом.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В предыдущем изложении мы старались представить читателю логическую схему специальной теории относительности, показать, что она является необходимым продолжением дорелятивистской, ньютоновской физики. Но всякая физическая теория должна быть количественной, ее закономерности могут быть выражены в полном виде только с помощью математических формул.

К счастью, чтобы изложить специальную теорию относительности, вполне достаточно средств элементарной алгебры. Если читатель пожелает проследить за дальнейшими простыми выкладками, то для него станет гораздо яснее, что выводы из теории относительности совсем не парадоксальны, а вполне естественны.

Мы начнем с той формулы, которая, по-видимому, известна каждому грамотному человеку: пройденный путь равняется скорости, умноженной на время движения. Пусть формула относится не к движению какого-нибудь тела, а к распространению светового сигнала: обозначим через r расстояние, пройденное сигналом, через c — скорость света и t пусть будет временем распространения. Тогда получится

$$r = ct \tag{1}$$

Скорость распространения сигнала одинакова во всех направлениях, поэтому передний фронт световой волны имеет форму шара с радиусом r . В центре шара находится излучатель, посылающий сигнал.

Все ли здесь на самом деле так просто, как может показаться? Утверждение, что путь равен скорости, умноженной на время, есть только определение скорости. Но каждым определением надо пользоваться с известной осторожностью.

Чтобы понять, в чем здесь трудность, применим то же уравнение (1) к распространению звука. Ясно, что в такой простой форме оно будет относиться только к неподвижному источнику в покоящемся воздухе. Если, например, дует ветер, то скорость звука по ветру будет больше, чем против ветра, так что расстояние от источника до фронта будет в одном направлении меньше, чем в другом. То же произойдет, если источник движется в покоящемся воздухе. В обоих случаях нельзя считать, что источник будет находиться в центре поверхности фронта волны,

Почему же в применении к свету уравнение (1) сферического фронта безусловно верно? Потому что независимо от движения источника или приемника скорость света в пустоте относительно любого тела всегда одинакова в любом направлении и равна одной и той же величине $c = 300\,000$ км/сек. Это доказано опытом Майкельсона.

Независимо от того, скреплен ли источник света с прибором и движется вместе с Землей или не участвует в движении Земли (Солнце, звезда), скорость света одинакова и по движению и перпендикулярно движению Земли. Следовательно, ни скорость Земли, ни скорость источника не сказываются на скорости света. В отличие от *звука* ясно, что при движении источника *звука* фронт волны в воздухе будет ближе к источнику с той стороны, куда направлена скорость источника. Следовательно, относительно движущегося источника скорость фронта волны здесь иная, чем относительно воздуха.

Но для световой волны уравнение (1) справедливо всегда, как бы ни двигался источник или наблюдатель, регистрирующий положение фронта. Строго говоря, это относится к равномерному движению, но нас пока интересует именно движение с постоянной скоростью.

Мы видели, что если расстояния в пространстве и промежутки времени были одинаковы для всех наблюдателей, то никак не могла бы оставаться неизменной скорость света c (см. рис. 3). То и другое взаимно исключаются. Значит относительно другого наблюдателя уравнение (1) должно иметь подобный, но не тождественный вид:

$$r' = ct'. \quad (2)$$

Здесь c то же, что и в (1), но $r' \neq r$, $t' \neq t$.

Наша задача состоит в том, чтобы связать между собой r' и r , а также t' и t , если известно относительное движение обоих наблюдателей.

Пусть относительная скорость наблюдателей равна V . Будем отсчитывать расстояние от источника до фронта волны по направлению скорости. Это расстояние назовем буквой x , в отличие от расстояния до произвольной точки фронта r . Соответственно у второго наблюдателя обозначим аналогичную величину через x' .

Надо найти такую связь между x , t и x' , t' , чтобы уравнение (2) при подстановке в него x' и t' , выраженных через x и t , автоматически переходило в (1) для этих последних.

Какой может быть искомая зависимость?

Ее самый общий вид не должен быть иным, чем такой:

$$x = \kappa x' + lt' \quad (3)$$

$$t = mx' + nt', \quad (4)$$

что выражает пропорциональную зависимость между двумя парами величин. Почему мы так уверены, что зависимость никак не может оказаться более сложной, например, квадратичной?

Чтобы ответить на этот вопрос, решим (3) и (4) относительно x' и t' , как обычные уравнения с двумя неизвестными. Получится следующее:

$$x' = \frac{nx - lt}{\kappa n - lm} \quad (5)$$

$$t' = \frac{kt - mx}{kn - lm}, \quad (6)$$

так что в ответе вышла тоже пропорциональная зависимость.

Всякие другие уравнения, кроме (3) и (4), разрешенные относительно x' , t' , будут выглядеть совершенно иначе. Например, квадратичная зависимость в (3) и (4) повела бы к появлению корней в (5) и (6). Иначе говоря, x и t выражались бы через x' и t' не так, как x' и t' через x и t .

Но мы не имеем права утверждать, что наблюдатель, величины которого мы снабдили штрихами, стал от этого чем-то превосходить наблюдателя, не удостоившегося этого случайного знака отличия. Например, нельзя допустить, чтобы прямые формулы перехода содержали степени, а обратные — корни. Во всем существенном те и другие формулы должны совпадать.

Но если так, то коэффициент при x' в (3) обязан равняться коэффициенту при x в (5), равно как и коэффициенты при t' в (4) и при t в (6). Отсюда имеем два равенства:

$$k = \frac{n}{kn - lm} \quad (7)$$

$$n = \frac{k}{kn - lm} \quad (8)$$

Поделим теперь уравнение (7) на (8). Тогда знаменатель $kn - lm$ в правых частях сократится и получится просто

$$\frac{k}{n} = \frac{n}{k} \quad (9)$$

Отсюда следует одно из двух: либо $k = n$, либо $k = -n$. Но $k = -n$ невозможно. Действительно, пусть скорость V очень малая величина, в пределе нуль. При этом должно быть просто $x = x'$, $t = t'$, а из $k = -n$ получилось бы $t = -t'$, что бессмысленно.

Подставляя $k = n$ назад в (7), получим

$$kn - lm = 1 \quad (10)$$

Это пока все, что можно извлечь из равноправия обоих наблюдателей, «нештрихованного» и «штрихованного».

Уже было условлено, что второй наблюдатель движется относительно первого со скоростью V . Следовательно, с той же скоростью движется и начало координат штрихованной системы, то есть та точка, где $x' = 0$.

Как видно из (5), для этой точки

$$\frac{x}{t} = \frac{l}{n}$$

Но $\frac{x}{t}$ есть как раз скорость этой точки, то есть V , относительно наблюдателя, координаты которого штрихов не имеют. Следовательно

$$\frac{l}{n} = V, \quad (11)$$

Пользуясь тем, что $\kappa = n$, получим

$$l = nV = \kappa V. \quad (12)$$

Применим теперь равенства (3) и (4) к распространению световой волны, для которой $x = ct$, $x' = ct'$. Подставляя, имеем

$$ct = (\kappa c + l) t' \quad (13)$$

$$t = (cm + n) t' \quad (14)$$

Деля эти равенства друг на друга, найдем

$$c = \frac{\kappa c + l}{mc + n}. \quad (15)$$

или, приводя к общему знаменателю,

$$mc^2 + nc = \kappa c + l. \quad (16)$$

Но мы доказали, что $n = \kappa$, так что

$$m = \frac{l}{c^2} = \frac{\kappa V}{c^2} \quad (17)$$

Подставим теперь $\kappa = n$, (12) и (17) в (10). Тогда получается

$$\kappa^2 \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right) = 1,$$

откуда

$$\kappa = \pm \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (18)$$

Если выбрать в этом равенстве верхний знак, то $\kappa = 1$, когда $V = 0$, а при нижнем знаке $\kappa = -1$ при $V = 0$. Но $V = 0$ отвечает наблюдателям, покоящимся друг относительно друга. Поэтому κ не может равняться -1 . Беря верхний знак, получим окончательно

$$\kappa = n = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (19)$$

$$l = \frac{V}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (20)$$

$$m = \frac{\frac{V}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (21)$$

Возвращаясь теперь в (3) и (4) или в (5) и (6), находим искомые формулы перехода

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (22)$$

$$t = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad (23)$$

а для обратного перехода

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (24)$$

$$t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (25)$$

Как видно из этих формул, x и t действительно выражаются через x' и t' совершенно подобно тому, как x' и t' через x и t , что и требовалось. Вся разница заключается в том, что в одном случае берется V , а в другом — $-V$. Но это вполне естественно, ведь если первый наблюдатель имеет скорость V относительно второго, то второй будет иметь скорость $-V$ относительно первого.

В дальнейшем надо применять формулы (22)—(25) не только к распространению световых сигналов, но вообще к координатам и времени любых событий, если задавать их относительно различно движущихся наблюдателей. Только тогда не возникнет то противоречие между механикой частиц и электродинамикой, которое получается, если складывать скорости частиц с относительной скоростью наблюдателей по обычным формулам, а скорость света считать постоянной, не складывающейся ни с чем.

Формулы (22) — (25) называются преобразованиями Лорентца. Они, как уже говорилось, были получены до теории относительности. Но правильно истолковал их только Эйнштейн. Разумеется, приведенный здесь вывод уже основан на правильном истолковании — нецелесообразно было бы заставить читателя проделать весь тот сложный путь, который пришлось пройти физике от Максвелла до Эйнштейна.

Рассмотрим теперь следствия из преобразований Лорентца. Прежде всего покажем, что они являются естественным обобщением дорелятивистских соотношений и при малых скоростях наблюдателей приводят к обычному закону сложения скоростей.

Даже у самого относительно быстрого макроскопического тела, например космической ракеты, скорость V порядка 10 км/сек. Для нее отно-

шение $\frac{V}{c}$ около одной тридцатитысячной, $(\frac{V}{c})^2$ порядка одной миллиардной. Поэтому, если в формулах (22)—(25) отбросить все члены, содержащие отношение $\frac{V}{c}$, то ошибка не превысит 1/30 000. Тогда останется

$$x = x' + Vt, \quad t = t'. \quad (26)$$

Второе равенство означает переход к единому универсальному времени, которое лежит в основе механики Ньютона. Из первого равенства легко получить закон сложения скоростей. Пусть некоторая точка движется со скоростью v относительно нештрихованной координатной системы. Для этой точки $x = vt$. Если относительно штрихованной системы ее скорость v' , то $x' = v't' = v't$. Подставляя это в первое равенство (25) и сокращая на t , получим

$$v' = v + V, \quad (27)$$

то есть обычный закон сложения скоростей.

Как же выглядит этот закон в точной форме, непосредственно по уравнениям (22)—(23)? Чтобы увидеть это, положим снова $x = vt$, $x' = v't'$, подставим в (22) — (23) и поделим их друг на друга. Тогда после сокращения на t слева и на t' справа получим:

$$v' = \frac{v + V}{1 + \frac{vV}{c^2}} \quad (28)$$

Эта формула переходит в (27), если величина $\frac{vV}{c^2}$ в знаменателе мала по сравнению с единицей и может быть отброшена.

Но есть один случай, когда этой величиной заведомо нельзя пренебречь. Вспомним опыт Физо по определению скорости света в текущей воде. По сравнению со скоростью света в пустоте она не является малой: как известно из оптики, в воде скорость света равна $\frac{c}{N}$, где N — показатель преломления воды. Для видимого света $N = 1,4 \cdot \frac{c}{N}$ надо подставить в формулу (28) вместо v , тогда v будет скоростью света в воде, измеряемой относительно трубы, в которой течет вода.

Подстановка дает:

$$v = \frac{\frac{c}{N} + V}{1 + \frac{V}{cN}} = \frac{c}{N} \frac{1 + \frac{NV}{c}}{1 + \frac{V}{Nc}} \quad (29)$$

Здесь V означает скорость воды. Как видно из (29), и числитель и знаменатель дают поправки одного порядка малости к величине $\frac{c}{N}$. Из нерелятивистской формулы (27) получился бы только числитель. Поэтому в опыте Физо и не вышло точного согласия с простой формулой сложения скоростей (27).

В то же время из уравнения (29) еще раз видно, что скорость света в пустоте не складывается ни с какой другой. Для пустоты $N = 1$, так что числитель и знаменатель в (28) сокращаются: если $v' = c$, то и $v = c$. Поэтому между результатами опытов Физо и Майкельсона нет никакого противоречия.

До теории относительности считалось, что есть одно явление, с которым не согласуется опыт Майкельсона. Речь идет о так называемой астрономической аберрации света. Сущность этого явления можно понять на таком примере. Пусть два поезда идут навстречу друг другу с одинаковыми скоростями относительно земли. Ветра нет, и идет совершенно прямой дождь, то есть капли падают на землю вертикально вниз. На оконных стеклах поездов капли оставят не вертикальные, а косые следы, отклоненные от направления отвеса в сторону, обратную ходу поездов. Следовательно, относительно земли следы на стеклах обоих поездов отклонятся в противоположные стороны. Понятно, что отклонение капель обязано сложению их вертикальной скорости падения с горизонтальными скоростями движения поездов.

Если тот же поезд будет идти под прямым дождем по кругу, то капли на стекле все время будут отклоняться в сторону, обратную ходу поезда, но в противоположных точках круга отклонения получатся в разные стороны относительно земли.

Совершенно аналогичное явление открыл в XVIII веке Брэдли: при движении Земли вокруг Солнца лучи звезд отклоняются в противоположные стороны относительно Солнца в противоположащих точках земной орбиты. Это и называется аберрацией, или отклонением света.

Как же получается, что в опыте Майкельсона скорость Земли не складывалась со скоростью света (даже идущего от звезды), а явление аберрации, несомненно, обязано сложению этих скоростей?

Ответ заключается в том, что при аберрации складывается не вся величина скорости света, а только ее составляющая по направлению движения Земли. Пусть, например, луч звезды идет по диаметру орбиты. Он, очевидно, пересекает орбиту Земли оба раза под прямым углом. В системе координат, связанной с Солнцем, проекция скорости света на направление орбиты поэтому равна нулю. В (точной!) формуле сложения скоростей (28) надо положить $v = 0$, $V =$ скорости Земли $= 30$ км/сек. Но тогда получится, что проекция скорости света звезды v' на направление движения Земли в системе, связанной с Землей, равна V , а в противоположной точке орбиты $v' = -V$. Следовательно, относительно Земли луч света отклонится на угол $\frac{V}{c}$ в заданной мере, или в угловой мере на $20,25''$.

Это отклонение никак не противоречит теории относительности, потому что в пространстве не существует абсолютного направления и отклоненный луч в принципе ничем не «хуже» неотклоненного. Абсолютная же величина скорости света и при аберрации сохраняется точно так же, как в опыте Майкельсона. Весь вывод преобразований Лорентца был построен только на том, что сферический фронт волны должен всегда оставаться сферическим, но не обязательно, чтобы точке на сфере радиуса r отве-

чала на сфере радиуса r' точка на той же широте, то есть под тем же углом к некоторому направлению.

Переходим теперь к самым интересным следствиям из преобразований Лорентца. Прежде всего рассмотрим, как возникает сокращение времени. Допустим, что движущийся наблюдатель имеет с собой часы (мы уже говорили, что часами может быть любое равномерно действующее периодическое устройство, даже сердце). В начальный момент эти часы надо поставить по часам неподвижного наблюдателя. Иначе говоря, надо условиться, что при $t = 0$ равно нулю и t' . Часы, показывающие время t' , движутся вместе с наблюдателем. Если они помещены в начале его системы координат, то для них всегда $x' = 0$. Разумеется, относительно нештрихованной системы эти часы движутся с постоянной скоростью V . Итак, подставим $x' = 0$ в уравнение (23). Тогда получится

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (30)$$

Но $\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$ всегда меньше единицы, так что t больше t' . Сверяя свои часы с часами движущегося наблюдателя, неподвижный наблюдатель видит, что другие часы отстают.

Но ведь не существует абсолютного движения: какого из наблюдателей выбрать в качестве неподвижного должно быть безразличным. И действительно, пусть теперь «штрихованный» наблюдатель смотрит на часы «нештрихованного». Для этих часов $x = 0$ и по формуле (25) получится

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (30a)$$

Уравнения (30) и (30a) также не противоречат друг другу, как (23) и (25). Они выражают одно и то же: движущиеся часы отстают относительно неподвижных. В такой постановке бессмысленно спрашивать, какие из них отстают на самом деле: отстают те и другие относительно часов наблюдателя, который не движется вместе с ними. Столь же бессмысленно спрашивать, где отвес вертикальнее, в Москве или во Владивостоке: оба вертикальны, но находятся под углом один к другому.

Совсем иначе обстоит дело с космонавтом. Допустим, что он двигался в течение времени $\frac{t}{2}$ от Земли со скоростью V , а затем возвращался на Землю то же время со скоростью $-V$. Время t измерено по земным часам. Не подлежит сомнению, что возвращался именно космонавт, потому что в момент поворота он, а не земной наблюдатель, испытывал силы инерции. Поэтому время космонавта t' согласно (29) равно

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \quad (31)$$

Если когда-нибудь удастся достичь скорости, равной 0,99 от скорости света, то $t' = \frac{1}{7} t$ и за семь земных лет космонавт проживет один год,

Перейдем теперь к вопросу о сокращении движущихся масштабов. Чтобы измерить длину такого масштаба, неподвижный наблюдатель одновременно сделает засечки концов на своем масштабе. Для этого надо положить время t между засечками в системе неподвижного наблюдателя равным нулю. Из (24) получится

$$x' = \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad (32)$$

x означает расстояние между засечками, измеренное неподвижным наблюдателем. Мы видим, что x меньше x' , то есть движущийся масштаб сократился относительно неподвижного.

Надо заметить, что относительно движущегося масштаба засечки были сделаны не одновременно, так что $t' \neq 0$.

Хотя отрезки длины и времени при лорентцевых преобразованиях изменяются, существует величина, которая остается неизменной. Пусть два события отделены расстоянием x и промежутком времени t . Относительно другого наблюдателя расстояние между событиями пусть будет x' , а время t' , x' и t' выражаются через x и t по формулам (24), (25). Образует следующее выражение:

$$s^2 = c^2(t')^2 - (x')^2 \quad (33)$$

Подставляя в это определение x' и t' , легко убедиться после возведения в квадрат и вычитания, что

$$s^2 = c^2(t')^2 - (x')^2 = c^2t^2 - x^2 \quad (34)$$

Иначе говоря, s^2 не изменяется, в отличие от x и t . Очевидно, что такая неизменная величина имеет фундаментальное значение для теории. Она называется интервалом между данными двумя событиями.

Мы фактически уже пользовались интервалом, чтобы построить кривые рис. 5. Для каждой из этих кривых величина s^2 одна и та же, так как кривая A_1A_2 отвечает определенной паре событий, равно как B_1B_2 — другой паре событий.

Разница между кривыми заключается в том, что для первой $s^2 > 0$, так что s — величина действительная, а для второй $s^2 \leq 0$, так что s — мнимая.

Существует и такая система, относительно которой первая пара событий произошла в одной точке пространства ($x_0 = 0$). Например, в системе, связанной с пулей, выстрел и попадание происходят в одной точке. Но, разумеется, тогда второе событие произошло позже первого (попадание после выстрела). В этой системе

$$s^2 = ct_0^2. \quad (35)$$

Очевидно, что s^2 всегда больше нуля, так что и относительно любой системы всегда будет

$$c^2t^2 > x^2, \quad (36)$$

чтобы $s^2 = c^2t^2 - x^2$ могло быть положительно. Этим свойством как раз обладает кривая A_1A_2 . Она лежит целиком в будущем относительно на

чального события. Поэтому область мира выше асимптот $x = \pm ct$ называется абсолютно будущим относительно начального события. Напомним, что совокупность координат и времени называется «миром».

В абсолютно удаленной области $c^2t^2 \ll x^2$, $s^2 \ll 0$.

Все написанные здесь соотношения относятся к релятивистской кинематике, так как в них нигде не входит масса тел. Посмотрим теперь, как выглядит релятивистская динамика.

В ньютоновской динамике существуют две основные величины: количество движения материальной точки с массой M , $p = Mv$, и кинетическая энергия $E = \frac{Mv^2}{2}$. При упругом столкновении двух частиц эти величины в сумме сохраняются относительно любой системы координат.

Исходя из этого требования, удается построить такие же величины и в теории относительности:

$$p = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (37)$$

$$E = \frac{Mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (38)$$

Путем некоторых вычислений можно убедиться в том, что суммарное количество движения (37) и суммарная энергия (38) для двух частиц сохраняются относительно любой системы, если при переходе от одной системы к другой пользоваться преобразованиями Лорентца. Поэтому мы имеем все основания отождествить p из (37) с количеством движения, а E из (38) с энергией частицы. Значение этих величин как раз в том, что они удовлетворяют закону сохранения.

Из формулы (38) видно, что и покоящаяся частица обладает энергией $E_0 = Mc^2$. Покажем, как пользоваться этим выражением. Допустим, что имеется покоящаяся ядерная частица, которая затем распадается на две частицы с массами M_1 и M_2 . Тогда можно определить скорости разлетающихся частиц, применяя законы сохранения количества движения и энергии. Так как исходная частица покоилась, ее количество движения равнялось нулю. Следовательно, у разлетающихся частиц эта величина в сумме тоже равна нулю:

$$\frac{M_1 v_1}{\sqrt{1 + \frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{M_2 v_2}{\sqrt{1 + \frac{v_2^2}{c^2}}} = 0. \quad (39)$$

Закон сохранения энергии запишется теперь так:

$$\frac{M_1 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{M_2 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} = Mc^2. \quad (40)$$

Из уравнений (39) и (40) определяются обе неизвестные величины v_1 и v_2 .

Разумеется, всегда должно быть $v_1 \leq c$, $v_2 \leq c$, так как в противном случае квадратные корни стали бы мнимыми. Никакая частица с конечной массой не может иметь скорость большую или хотя бы равную c . Если корни действительны, то они во всяком случае меньше единицы. Из (40) видно, что при этом обязательно $M > M_1 + M_2$. Масса исходной частицы больше суммы масс продуктов распада. Таким образом, теория относительноности показывает, что закон сохранения массы имеет приближенный характер. При химических превращениях отклонения от этого закона пренебрежимо малы, а при ядерных — вполне заметны.

Из формул (37) и (38) можно исключить скорость v , то есть выразить энергию E через p . Это дает

$$E = \sqrt{M^2 c^4 + c^2 p^2}. \quad (41)$$

Мы видим, что и при $M = 0$ получается вполне осмысленное соотношение

$$E = cp. \quad (42)$$

Деля уравнение (39) на (38), видим, что

$$E = \frac{c^2 p}{v}. \quad (43)$$

Это совместимо с (42), только если $v = c$, то есть если такая частица движется со скоростью света. Разумеется, вступая во взаимодействие с другими частицами, частица с нулевой массой может передавать им свою энергию и свое количество движения. Иначе говоря, нет никакого сомнения в физической реальности этой частицы, раз она способна взаимодействовать с материей, находящейся в других формах.

В настоящее время экспериментальная физика имеет дело всего с двумя частицами, имеющими нулевую массу: световым квантом и нейтрино. Во всех остальных свойствах эти частицы различаются сильнейшим образом. Со скоростью света движется и гравитон, но пока только в уравнениях теоретической физики. Никаких средств его регистрации на опыте, как отдельной частицы, сейчас указать нельзя.



СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Рождение науки о пространстве и времени	3
Представления о пространстве и времени после Ньютона	4
Развитие учения о свете и электричестве	7
Опыт Майкельсона и электронная теория	11
Специальный принцип относительности	16
Теория относительности в микромире	24
Силы тяготения и силы инерции	30
Геометрия искривленного мира и закон тяготения	35
Следствия из общей теории относительности	43
Приложение	51

Автор Александр Соломонович Компанеец

Техн. редактор А. С. Назарова

Редактор И. Б. Файнбойм

Корректор Н. М. Краснопольская
Обложка художника Р. Г. Алеева

Сдано в набор 7/IX 1961 г. Подписано к печати 10/XI 1961 г. Изд. № 270
Формат бум. 60×92¹/₁₆ Бум. л. 2,0 Печ. л. 4,0 Уч.-изд. л. 3,73.
A08936. Цена 12 коп. Тираж 25 500. Заказ 2840.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4,

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ!

Уважаемые товарищи!

Не забудьте своевременно подписаться на брошюры издательства «Знание» на 1961 год.

«НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ»

Таково будет общее название выпускаемых в 1962 году 12 серий. Пропаганда материалов XXII съезда КПСС, главные события в нашей стране и в международной жизни, последние открытия в различных областях науки, новейшие достижения техники — таково будет содержание брошюр.

Они будут написаны живо, доходчиво, убедительно, содержать необходимый справочный материал.

Рассчитаны серии брошюр на лекторов и пропагандистов, а также на самый широкий круг читателей, специалистов различных отраслей народного хозяйства, занимающихся самообразованием.

Выпускаться в 1962 году будут следующие серии:

- | | |
|------------------------------|---|
| I — история. | VII — международная. |
| II — философия. | VIII — биология и медицина. |
| III — экономика. | IX — физика, химия, математика, астрономия. |
| IV — техника. | X — молодежная. |
| V — сельское хозяйство. | XI — педагогика. |
| VI — литература и искусство. | XII — геология и география. |

По каждой серии подписчики получают 24 брошюры в год, каждая средним объемом 2,5 печ. листа. Подписная цена на год — 1 р. 80 к., на полугодие — 90 к., на квартал 45 к., на месяц — 15 к.

Подписка принимается на весь 1962 год, на полугодие, на квартал и с любого месяца до конца года всеми без исключения пунктами подписки «Союзпечать» и общественными распространителями печати.

Подпишитесь, товарищи, сами! Привлекайте новых подписчиков!

Издательство «Знание».

ДОРОГИЕ ЧИТАТЕЛИ

Обращаемся к вам с большой просьбой.

Издательство «Знание» предполагает отметить лучшие за этот год брошюры по каждой из подписных серий и поощрить их авторов. Мы приглашаем вас принять участие в этой работе.

НАПИШИТЕ НАМ:

1. Какие брошюры вы считаете лучшими (серия, автор, название).

2. В чем с вашей точки зрения достоинства указанных вами брошюр:

по содержанию и идейно-теоретическому уровню,

по доступности изложения, стилю, языку,

по вспомогательному материалу.

3. Какую помощь оказали эти брошюры в вашей практической деятельности — лекторской, пропагандистской, производственной, в вашем самообразовании.

4. Каковы ваши критические замечания по этим брошюрам.

Будем благодарны, если вы сообщите также ваши общие соображения и пожелания на будущее по оформлению, тематике, содержанию и научно-теоретическому уровню брошюр и мастерству изложения материала.

Письма просьба присылать в течение четвертого квартала 1961 и января 1962 года.

Заранее благодарим вас за активное участие в выполнении просьбы издательства. О результатах отбора лучших брошюр за текущий год читатели будут извещены.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»