1. Общие положения теории относительности

Чтобы увидеть значение теории относительности Эйнштейна для
эволюции физической мысли, следует прежде всего остановиться на
самых общих понятиях относительности положения и движения тел и
однородности пространства и времени. В теории Эйншиейна фигуриру-
ет однородность и изотропность пространства-времени.
Представим себе материальную частицу, затерянную в бесконеч-
ном, абсолютно пустом пространстве. Что в этом случае означают
слова "пространственное положение" частицы? Соответствует ли этим
словам какое-либо реальное свойство частицы?
Если бы в пространстве существовали другие тела, мы могли бы
определить по отношению к ним положение данной частицы, но если
пространство пусто, положение данной частицы оказывается бессо-
держательным понятием. Пространственное положение имеет физичес-
кий смысл только в том случае, когда в пространстве имеются иные
тела, служащие телами отсчета. Если брать в качестве тел отсчета
разные тела, мы придем к различным определениям пространственного
положения данной частицы. С любым телом мы можем связать некото-
рую систему отсчета, например систему прямоугольных координат.
Такие системы равноправны: в какой бы системе отсчета мы ни опре-
деляли положение точек, из которых состоит данное тело, размеры и
форма тела будут одними и теми же, и, измеряя расстояния между
точками, мы не найдем критерия, чтобы отличить одну систему отс-
чета от другой. Мы можем поместить начало координат в любой точке
пространства, мы можем затем перенести это начало в любую другую
точку, либо повернуть оси, либо сделать и то и другое - форма и
размеры тела при таком переносе и повороте не изменятся, так как
не изменится расстояние между любыми двумя фиксированными точками
этого тела. Неизменность этого расстояния при переходе от одной
системы отсчета к другой называют 1 инвариантностью 0 по отношению к
указанному переходу. Мы говорим, что расстояния между точками те-
ла являются 1 инвариантами 0 при переходе от одной прямоугольной сис-
темы координат другой, с иным началом и иным направлением осей.
Расстояния между точками тела служат инвариантами таких коорди-
натных преобразований. В инвариантности расстояний между точками
относительно переноса начала координат выражается однородность
пространства, равноправность всех его точек относительно начала
координат.
Если точки пространства равноправны, то мы не можем опреде-
лить пространственное положение тела абсолютным образом, мы не
можем найти привилегированную систему отсчета. Когда мы говорим о
положении тела, т.е. о координатах его точек, то необходимо ука-
зывать систему отсчета. "Пространственное положение" в этом смыс-
ле является относительным понятием - совокупностью величин, кото-
рые меняются при переходе от одной системы координат к другой
системе, в отличие от расстояний между точками, которые не меня-
ются при указанном переходе.
Однородность пространства выражается, далее, в том, что сво-
бодное тело, переходя из одного места в другое, сохраняет одну и
ту же скорость и соответственно сохраняет приобретенный им им-
пульс. Каждое изменение скорости и, соответственно, импульса, мы
объясняем не тем, что тело передвинулось в пространстве, а взаи-
модействием тел. Изменение импульса данного тела мы относим за
счет некоторого силового поля, в котором оказалось рассматривае-
мое тело.
Нам известна также однородность времени. Она выражается в
сохранении энергии. Если с течением времени не меняется воздейс-
твие, испытываемое данным телом со стороны других тел, иными сло-
вами, если иные тела действуют неизменным образом на данное тело,
то энергия его сохраняется. Мы относим изменение энергии тела за
счет изменения во времени действующих на него сил, а не за счет
самого времени. Время само по себе не меняет энергии системы, и в
этом смысле все мгновения равноправны. Мы не можем найти во вре-
мени привилегированного мгновения, также как не можем найти в
пространстве точку, отличающуюся от других точек по поведению по-
павшей в эту точку частицы. Поскольку все мгновения равноправны,
мы можем отсчитывать время от любого мгновения, объявив его на-
чальным. Рассматривая течение событий, мы убеждаемся, что они
протекают неизменным образом, независимо от выбора начального мо-
мента, начала отсчета времени.
Мы могли бы сказать, что время относительно в том смысле,
что при переходе от одного начала отсчета времени к другому опи-
сание событий остается справедливым и не требует пересмотра. Од-
нако обычно под относительностью времени понимают нечто иное. В
простом и очевидном смысле независимости течения событий от выбо-
ра начального момента относительность времени не могла бы стать
основой новой теории, совсем не очевидной, опрокидывающей обычное
представление о времени.
Под относительностью времени мы будем понимать зависимость
течения времени от выбора пространственной системы отсчета. Соот-
ветственно абсолютным временем называется время, не зависящее от
выбора пространственной системы координат, протекающее единооб-
разно на всех движущихся одна относительно другой системах отсче-
та, - последовательность моментов, наступающих одновременно во
всех точках пространства. В классической физике существовало
представление о потоке времени, который не зависит от реальных
движений тела, - о времени, которое течет во всей Вселенной с од-
ной и той же быстротой. Какой реальный процесс лежит в основе по-
добного представления об абсолютном времени, о мгновении, однов-
ременно наступающем в отдаленных пунктах пространства?
Вспомним условия отождествления времени в разных точках
пространства.
Время события, происшедшего в точке а 41 0, и время события,
происшелшего в точке а 42 0 можно отождествить, если события связаны
мгновенным воздействием одного события на другое. Пусть в точке
а 41 0 находится твердое тело, соединенное абсолютно жестким, совер-
шенно недеформирующимся стержнем с телом, находящимся в точке а 42 0.
Толчок, полученный телом в точке а 41 0, мгновенно, с бесконечной
скоростью, передается через стержень телу в точке 4  0а 42 0. Оба тела
сдвинутся в одно и то же мгновение. Но все дело в том, что в при-
роде нет абсолютно жестких стержней, нет мгновенных действий од-
ного тела на другое. Взаимодействия тел передаются с конечной
скоростью, никогда не превышающей скорости света. В стержне, сое-
диняющем тела, при толчке возникает деформация, которая распрост-
раняется с конечной скоростью от одного конца стержня к другому,
подобно тому, как световой сигнал идет с конечной скоростью от
источника света к экрану. В природе нет мгновенных физических
процессов, соединяющих события, происшедшие в удаленных один от
другого пунктах пространства. Понятие "один и тот же момент вре-
мени" имеет абсолютный смысл, пока мы не сталкиваемся с медленны-
ми движениями тел и можем приписать бесконечную скорость светово-
му сигналу, толчку, переданному через твердый стержень или любому
другому взаимодействию движущихся тел. В мире быстрых движений,
при сравнении с которыми распространению света и взаимодействию
между телами уже нельзя приписывать бесконечно большую скорость,
- в этом мире понятие одновременности имеет относительный смысл,
и мы должны отказаться от привычного образа единого времени, те-
кущего во всей Вселенной, - последовательности одних и тех же,
одновременных, моментов в различных пунктах пространства.
Классическая физика исходит из подобного образа. Она допус-
кает, что одно и то же мгновенно наступает повсюду - на Земле, на
Солнце, на Сириусе, на внегалактических туманностях, отстоящих от
нас так далеко, что их свет идет к нам миллиарды лет.
Если бы взаимодействия тел (например силы тяготения, связы-
вающие все тела природы) распространялись мгновенно, с бесконеч-
ной скоростью, мы могли бы говорить о совпадении момента, когда
одно тело начинает воздействовать на другое, и момента, когда
второе тело, удаленное от первого, испытывает это воздействие.
Назовем воздействие тела на удаленное от него другое тело сигна-
лом. Мгновенная передача сигнала - основа отождествления момен-
тов, наступивших в отдаленных пунктах пространства. Такое отож-
дествление можно представить в виде синхронизации часов. Задача
состоит в том,чтобы часы в в точке а 41 и в точке а 42 показывали
одно и то же время. Если существуют мгновенные сигналы, эта зада-
ча не составляет труда. Часы можно было бы синхронизировать по
радио, световым сигналом, выстрелом из пушки, механическим им-
пульсом (посадить,например,стрелки часов в а 41 и в а 42 на один
длинный абсолютно жесткий вал), если бы радиоприемник, свет, звук
и механические напряжения в вале передавались с бесконечно боль-
шой скоростью. В этом случае мы могли бы говорить о чисто прост-
ранственных связях в природе, о процессах, протекающих в нулевой
промежуток времени. Соответственно трехмерная геометрия имела бы
реальные физические прообразы. Пространство в этом случае мы бы
могли рассматривать вне времени, и такой взгляд давал бы точное
представление о действительности. Временные мгновенные сигналы
служат прямым физическим эквивалентом трехмерной геометрии. Мы
видим, что трехмерная геометрия находит прямой прообраз в класси-
ческой механике, которая включает представление о бесконечной
скорости сигналов, о мгновенном распространении взаимодействий
между отдаленными телами. Классическая механика допускает, что
существуют реальные физические процессы, которые могут быть с аб-
солютной точностью описаны мгновенной фотографией. Мгновенная фо-
тография, разумеется стереоскопическая - это как бы трехмерное
пространственное сечение пространственно-временного мира, это че-
тырехмерный мир событий, взятый в один и тот же момент. Бесконеч-
но быстрое взаимодействие - процесс, который может быть описан в
пределах мгновенной временной картины мира.
Но теория поля как реальной физической среды исключает мгно-
венное ньютоново дальнодействие и мгновенное распространение сиг-
налов через промежуточную среду. Не только звук, но и свет, и ра-
диосигналы имеют конечную скорость. Скорость света - предельная
скорость сигналов.
Каков же в этом случае физический смысл одновременности? Что
соответствует последовательности одних и тех же для всей Вселен-
ной моментов? Что соответствует понятию единого времени, единооб-
разно протекающего во всем мире?
Мы можем найти некоторый физический смысл понятия одновре-
менности и таким образом придать самостоятельную реальность чисто
пространственному аспекту бытия, с одной стороны, и абсолютному
времени - с другой, даже в том случае, когда все взаимодействия
распространяются с конечной скоростью. Но условием для этого слу-
жит существование неподвижного в целом мирового эфира и возмож-
ность определить скорости движущихся тел абсолютным образом, от-
нося их кэфиру как единому привилегированному телу отсчета.
Представим себе корабль с экранами на носу и на корме. в
центре корабля на равных расстояниях от обоих экранов зажигают
фонарь. Свет фонаря одновременно достигает экранов, и мгновения,
когда это происходит можно отождествить. Свет падает на экран,
находящийся на носу корабля в то же самое мгновение, что и на эк-
ран, находящийся на корме. Таким образом, мы находим физический
прообраз одновременности.
Синхронизация с помощью световых сигналов, одновременно при-
бывающих в два пункта из источника, расположенного на равном
расстоянии от них, возможна, если источник света и указанные два
пункта покоятся в мировом эфире, т.е. когда корабль неподвижен по
отношению к эфиру. Синхронизация возможна и в том случае, когда
корабль движется в эфире. В указанном случае свет дойдет до экра-
на на носу корабля немного позже, а до экрана на корме - немного
раньше. Но, зная скорость корабля относительно эфира, мы можем
определить опережение луча, идущего к экрану на корме и запазды-
вание луча, идущего к экрану на носу, и, учитывая указанные опе-
режение и запаздывание, синхронизировать часы, установленные на
корме и на носу корабля. Мы можем, далее, синхронизировать часы
на двух кораблях, движущихся относительно эфира с различными, но
постоянными, известными нам скоростями. Но для этого также необ-
ходимо, чтобы скорость кораблей относительно эфира имела опреде-
ленный смысл и определенное значение.
Здесь возможны два случая. Если корабль при движении пол-
ностью увлекает за собой эфир, находящийся между фонарем и экра-
нами, то не произойдет запаздывания луча, идущего к экрану на но-
су корабля. При полном увлечении эфира, корабль не смещается от-
носительно эфира, находящегося над его палубой, а скорость света
относительно корабля небудет зависеть от движения корабля. Тем
не менее, мы сможем зарегистрировать зарегистрировать движение
корабля с помощью оптических эффектов. По отношению к кораблю
скорость света не изменится, но она изменится по отношению к бе-
регу. Пусть корабль движется вдоль набережной: на набережной -
два экран а 41 и а 42,причем расстояние между ними равно расстоянию
между экранами на корабле. Когда экраны на движущемся корабле
оказались против экранов на набережной, в центре корабля зажига-
ется фонарь. Если корабль увлекает за собой эфир, то свет фонаря
дойдет одновременно до экрана на корме и до экрана на носу, но в
этом случае свет дойдет в различные моменты до экранов на непод-
вижной набережной. В одном направлении скорость движения корабля
относительно набережной будет прибавляться к скорости света, а в
другом направлении скорость движения корабля нужно будет вычесть
из скорости света. Такой результат - различные скорости света от-
носительно берега - получится, если корабль увлекает эфир. Если
же корабль не увлекает эфир, то свет будет двигаться с одной и
той же скоростью относительно берега и с различной скоростью от-
носительно корабля. Таким образом, изменение скорости света ока-
жется результатом движения корабля в обоих случаях. Если корабль
движется, увлекая эфир, то меняется скорость относительно берега;
если же корабль не увлекает эфир, то меняется скорость света от-
носительно самого корабля.
В середине XIX века техника оптических экспериментов и изме-
рений позволила уловить очень небольшие различия в скорости све-
та. Оказалось возможным проверить, увлекают движущиеся тела эфир,
или не увлекают. В 1851 г. Физо (1819 - 1896) доказал6 что тела
не увлекают полностью эфир. Скорость света, отнесенная к непод-
вижным телам, не меняется, когда свет проходит через движущиеся
среды. Физо пропускал луч света через неподвижную трубку, по ко-
торой текла вода. По существу вода играла роль корабля, а трубка
- неподвижного берега. Результат опыта Физо привел к картине дви-
жения тел в неподвижном эфире без увлечения эфира. Скорость этого
движения можно определить по запаздыванию луча, догоняющего тело
(например, луча направленного к экрану на носу движущегося кораб-
ля), по сравнению с лучом, идущим навстречу телу (например, по
сравнению с лучом фонаря, направленным к экрану на корме). Тем
самым можно было, как казалось тогда, отличить тело, неподвижное
относительно эфира, от тела, движущегося в эфире. В первом ско-
рость света одна и та же во всех направлениях, во втором на меня-
ется в зависимости от направления луча. Существует абсолютное
различие между покоем и движением, они отличаются друг от друга
характером оптических процессов в покоющихся и движущихся средах.
Подобная точка зрения позволяла говорить об абсолютной од-
новременности событий и о возможности абсолютной синхронизации
часов. Световые сигналы достигают точек, расположенных на одном и
том же расстоянии от неподвижного источника, в одно и то же мгно-
вение. Если же источник света и экраны движутся относительно эфи-
ра, то мы можем определить и учесть запаздывание светового сигна-
ла, вызванное этим движением, и считать одним и тем же мгновением
1) момент попадания света на передний экран с поправкой на запаз-
дывание и 2) момент попадания света на задний экран с поправкой
на опережение. Различие в скорости распространения света будет
свидетельствовать о движении источника света и экранов по отноше-
нию к эфиру - абсолютному телу отсчета.
Эксперимент, который должен был показать изменение скорости
света в движущихся телах и соответственно абсолютных характер
движения этих тел, был выполнен в 1881 г. Майкельсоном (1852 -
1931). В последствии его не раз повторяли. По существу, экспери-
мент Майкельсона соответствовал сравнению скорости сигналов, иду-
щих к экранам на корме и на носу движущегося корабля, но в ка-
честве корабля была использована сама Земля, движущаяся в прост-
ранстве со скоростью около 30 км/сек. Далее, сравнивали не ско-
рость луча, догоняющего тело и луча, идущего навстречу телу, а
скорость распространения света в продольном и поперечном направ-
лениях. В инструменте, примененном в опыте Майкельсона, так назы-
ваемом интерферометре, один луч шел по направлению движения Земли
- в продольном плече интерферометра, а другой луч - в поперечном
плече. Различие в скоростях этих лучей должно было продемонстри-
ровать зависимость скорости света в приборе от движения Земли.
Результаты эксперимента Майкельсона оказались отрицательны-
ми. На поверхности Земли свет движется с одной и той же скоростью
во всех направлениях.
Такой вывод казался крайне парадоксальным. Он должен был
привести к принципиальному отказу от классического правила сложе-
ния скоростей. Скорость света одна и та же во всех телах, движу-
щихся по отношению друг к другу равномерно и прямолинейно. Свет
проходит с неизменной скоростью, приблизительно равной 300000
км/сек., мимо неподвижного тела, мимо тела, движущегося навстречу
свету, мимо тела, которое свет догоняет. Свет - это путник, кото-
рый идет по полотну железной дороги, между путями, с одной и той
же скоростью относительно встречного поезда, относительно поезда,
идущего в том же направлении, относительно самого полотна, отно-
сительно пролетающего над ним самолета и т.д., или пассажир, ко-
торый движется по вагону мчащегося поезда с одной и той же ско-
ростью относительно вагона и относительно Земли.
Чтобы отказаться от классических принципов, казавшихся со-
вершенно очевидными и непререкаемыми, понадобилась гениальная си-
ла и смелость физической мысли. Непосредственные предшественники
Эйнштейна подошли очень близко к теории относительности, но они
не могли сделать решающего шага, не могли допустить, что свет не
кажущимся образом, а в действительности распространяется с одной
и той же скоростью относительно тел, которые смещаются одно от-
носительно к другому.
Лоренц (1853-1928) выдвинул теорию, сохраняющую неподвижный
эфир и классическое правило сложения скоростей и вместе с тем
совместимую с результатами опытов Майкельсона. Лоренц предполо-
жил, что все тела при движении испытывают продольное сокращение,
они уменьшают свою протяженность вдоль направления движения.
Если все тела сокращают свои продольные размеры, то нельзя
обнаружить подобное сокращение непосредственным измерением, нап-
ример прикладыванием линейки с делениями к движущемуся стержню.
При этом движется и линейка и соответственно уменьшаются ее длина
и размеры нанесенных на нее делений. Лоренцово сокращение компен-
сирует изменения скорости света, вызванные движением тела относи-
тельно эфира. Луч света движется медленнее в продольном плече ин-
терферометра, но само плечо, благодаря движению, стало короче, и
свет проходит свой путь в продольном плече в течение того же вре-
мени, что и в поперечном плече. Различие в скорости света в силу
этого компенсируется и не может быть обнаружено. Таким образом
Лоренц рассматривает обнаруженное Майкельсоном постоянство ско-
рости света как чисто феноменологический результат взаимной ком-
пенсации двух эффектов движения: уменьшение скорости света и сок-
ращения проходимого им расстояния. С такой точки зрения класси-
ческое правило сложения скоростей остается незыблемым. Абсолютный
характер движения сохраняется - изменение скорости света сущест-
вует; следовательно, движение может быть отнесено не к другим те-
лам, равноправным эфиру, а к универсальному телу отсчета - непод-
вижному эфиру. Сокращение носит абсолютный характер - существует
истинная длина стержня, покоящегося относительно эфира, иными
словами, стержня, покоящегося в абсолютном смысле.
В 1905 г. Альберт Эйнштейн (1879-1955) опубликовал статью "К
электродинамике движущихся тел". В этой статье изложена теория,
исключающая существование абсолютного тела отсчета и привилегиро-
ванной системы координат для прямолинейного и равномерного движе-
ния. Теория Эйнштейна исключает абсолютное, независимое от прост-
ранственной системы отсчета время и отказывается от классического
принципа сложения скоростей. Эйнштейн исходит из субстанциональ-
ного постоянства скорости света, из того, что скорость света
действительно одна и та же в различных, движущихся одна по отно-
шению к другой системах. У Лоренца абсолютное движение тел приво-
дит к изменению скорости света в этих телах, и, таким образом,
обладает реальным физическим смыслом. Оно - это абсолютное движе-
ние - прячется от наблюдателя в силу сокращения продольных масш-
табов, затушевывающего оптический эффект абсолютного движения. У
Эйнштейна абсолютное движение не прячется от наблюдателя, а прос-
то не существует.
Если движение относительно эфира не вызывает никаких эффек-
тов в движущихся телах, то оно является физически бессодержатель-
ным понятием.
Оптические процессы в теле не могут быть критерием его рав-
номерного и прямолинейного движения. Равномерное и прямолинейное
движение тела А не изменяет хода оптических процессов, оно имеет
относительный смысл, должно быть отнесено к другому телу В и сос-
тоит оно в изменении расстояния между А и В.Мы можем с одним и
тем же правом присвоить роль тела отсчета, т.е. приписать непод-
вижность как телу А, так и телу В; фраза "тело А движется относи-
тельно тела В" и "тело В движется относительно тела А" описывает
одну и ту же ситуацию. Только такой смысл имеет равномерное и
прямолинейное движение. Оно отнесено к конкретным телам; мы можем
отнести движение тела А к различным телам отсчета, получить раз-
личные значения его скорости, и никакое абсолютное тело отсчета
типа эфира не должно фигурировать в научной картине мира. Движе-
ние тел относительно эфира и, следовательно, движение эфира отно-
сительно тел не имеют физического смысла.
Тем самым из физической картины мира устраняется понятие
единого времени, охватывающего всю Вселенную. Здесь Эйнштейн по-
дошел к самым коренным проблемам науки - к проблемам пространс-
тва, времени и их связи друг с другом.
Если нет мирового эфира, то нельзя приписать некоторому телу
неподвижность и на этом основании считать его началом неподвиж-
ной, в абсолютном смысле, привилегированной системы координат.
Тогда нельзя говорить и об абсолютной одновременности событий,
нельзя утверждать, что два события, одновременные в одной системе
координат, будут одновременными и во всякой другой системе коор-
динат.
Вернемся к кораблю с экранами на корме и на носу и к набе-
режной, на которой также установлены экраны. Когда вспышка фонаря
одновременно осветила экраны, мы можем говорить, что освещение
экрана на корме и на носу - одновременные события. В системе ко-
ординат, связанной с кораблем, эти события действительно одновре-
менны. Но мы не остановились на этой констатации и считали воз-
можным говорить об одновременности в абсолютном смысле. Тот факт,
что при движении корабля экраны освещаются не одновременно, нас
не смущал, мы учитывали запаздывание света, догоняющего корабль,
т.е. идущего от фонаря к экрану на носу. Мы всегда могли восполь-
зоваться абсолютно неподвижной, связанной с эфиром системой отс-
чета и перейти от движущегося корабля к неподвижной набережной и
убедиться, что в этой "неподвижной", "истинной", "абсолютной",
"привилегированной" системе отсчета свет распространяется во все
стороны с постоянной скоростью, а в других, движущихся, системах,
он меняет скорость. До теории Эйнштейна слова "неподвижная",
"привилегированная", "абсолютная" система отсчета не ставились в
кавычки: все были убеждены в существовании внутреннего критерия
движения - различия в ходе оптических процессов в неподвижных (в
абсолютном смысле, относительно неподвижного мирового эфира) те-
лах и в движущихся (также в абсолютном смысле) телах. Синхрониза-
ция часов казалась возможной даже в том случае, когда речь шла о
часах, расположенных в двух системах, из которых одна движется
относительно другой.
Когда корабль движется вдоль набережной, свет достигает эк-
ранов на корабле в различные моменты времени; но мы считали эти
моменты различными потому, что видели экраны на набережной, отож-
дествляли мгновения, когда свет попадает на эти неподвижные экра-
ны, приписывали абсолютный характер одновременности, зарегистри-
рованной в неподвижной системе отсчета. Теперь от всего этого
приходится отказаться. С точки зрения теории относительности, на-
ходясь на корабле и не видя набережной, нельзя найти доказатель-
ства неодновременности освещения экранов на носу и на корме. Мы
считали эти моменты неодновременными, потому что во время расп-
ространения света от фонаря к экранам корабль сдвинулся по отно-
шению к набережной, а эту набережную мы признаем неподвижной в
абсолютном смысле. Сверяя часы с помощью экранов на набережной,
т,е, считая одновременными мгновения, когда свет достиг этих не-
подвижных экранов, мы, естественно, должны различать моменты,
когда свет доходит до экранов на движущемся корабле. Но если дви-
жение корабля и неподвижность набережной не имеют абсолютного ха-
рактера, мы можем таким же правом рассматривать корабль в качест-
ве неподвижного тела отсчета. Тогда набережная движется, и на на-
бережной свет достигает береговых экранов в различные моменты
времени. Спор о том, какая система отсчета неподвижна в абсолют-
ном смысле, беспредметен, если нет абсолютно покоящегося тела
отсчета - мирового эфира. События, одновременные в одной системе
отсчета, неодновременны в другой системе.
Если нет абсолютной одновременности, то нет абсолютного вре-
мени, протекающего единообразно во всех смещающихся одна относи-
тельно другой системах. Время зависит от движения.
Какова эта зависимость, как изменяется ход времени при пере-
ходе из одной системе к другой? Еще до появления работы Эйнштейна
Лоренц утверждал, что при сокращении продольных масштабов в дви-
жущихся системах будет вместе с тем замедляться ход часов. Сокра-
щение масштабов и замедление хода часов как раз и будет компенси-
ровать изменение скорости света в движущихся системах. Поэтому
замедление хода часов, как и сокращение масштабов, можно вычис-
лить, исходя из постоянства скорости света.
У Эйнштейна сокращение продольных пространственных масштабов
и замедление времени в движущихся системах имеет совсем другой
смысл, чем у Лоренца. Время замедляется не по сравнению с "истин-
ным", "абсолютным" временем, текущим в неподвижных относительно
эфира, т.е. в абсолютно неподвижных, системах. Длина продольно
движущегося стержня сокращается не по сравнению с некоторой "ис-
тинной" и "абсолютной" длиной стержня, покоящегося в эфире. С
точки зрения Эйнштейна, сокращение масштабов (как и замедление
времени) взаимно.Если система К 5' движется относительно системы
К, то с таким же правом можно сказать, что система К движется от-
носительно системы К 5'. Длина стержня, измеренная в системе К, от-
носительно которой он покоится, окажется меньше, если ее изме-
рить в системе К 5'. Но, в свою очередь, стержень, покоящийся в
системе К 5', окажется короче при измерении в системе К. Речь идет
о вполне реальном измерении длины, но понятие "реальное измере-
ние" не означает существование неизменной абсолютной "привилеги-
рованной" длины.Причиной лоренцова сокращения служит реальный
процесс взаимного движения систем - процесс, в котором обе систе-
мы играют совершенно равноценную роль. Лоренцово представление о
реальном сокращении длины стержня по сравнению с неизменной, "ис-
тинной" длиной стержня, покоящегося в абсолютном смысле, - это
более "классическое", но вовсе не более естественное представле-
ние, чем представление Эйнштейна о взаимном сокращении масштабов
в системах, движущихся одна по отношению к другой. Взаимное пере-
мещение тел, изменение их взаимных расстояний легче представить
себе, чем абсолютное движение, отнесенное к пустому пространству
либо к однородному эфиру.
Идеи, высказанные Эйнштейном в 1905 году, уже в ближайшие
годы заинтересовали очень широкие круги. Люди чувствовали, что
теория, с такой смелостью посягнувшая на традиционные представле-
ния о пространстве и времени, не может не привести при своем раз-
витии и применении к очень глубоким производственно-техническим и
культурным сдвигам. Разумеется, только теперь стал ясен путь от
абстрактных рассуждений о пространстве и времени к представлению
о колоссальных запасах энергии, таящихся в недрах вещества и жду-
щих своего освобождения, чтобы изменить облик производственной
техники и культуры. Попытаемся несколькими штрихами обрисовать
этот путь, хотя две-три фразы не могут дать представления о цепи
глубоких и сложных математических построений, о многократном пе-
ресмотре самых, казалось бы, очевидных и прочных концепций клас-
сической физики.
Эйнштейн вывел из постоянства скорости света в движущихся
телах невозможность для этих тел превысить скорость света. Тем
самым из картины мира исключаются мгновенные, распространяющиеся
с бесконечной скоростью, воздействия одного физического объекта
на другой. Исключаются также воздействия, распространяющиеся с
конечной скоростью, превышающей скорость света. Два события могут
быть связаны друг с другом причинной связью, одно событие может
быть причиной второго, если время, прошедшее между событиями, не
меньше времени, необходимого свету, чтобы пройти расстояние между
точками, где произошли эти события. Такое представление о при-
чинной связи между событиями можно назвать релятивистским, в от-
личие от классического представления, допускавшего, что событие в
одной точке может повлиять на событие в другой точке при сколь
угодно малом промежутке времени между событиями.
Сопоставляя релятивистскую причинность с классической, можно
увидеть некоторую существенную для истории науки связь между ме-
ханической картиной мира и ее релятивистским обобщением. Причин-
ная связь между двумя событиями в отдаленных точках 4  0а 41 и а 42 сос-
тоит в том, что событие в точке а 41 вызывает отправление некоторо-
го сигнала, который, прибыв в точку а 42, вызывает здесь второе со-
бытие. Первым событием может быть, например, выстрел, а вторым -
попадание снаряда в цель. Причинная связь состоит в движениисна-
ряда, играющего в этом примере роль сигнала. Бесконечная скорость
сигнала означала бы, что причина (отправление передающего воз-
действия сигнала из а 41) и следствие (его приход в а 42) возникают
одновременно. Следовательно, причинная связь может быть представ-
лена в чисто пространственном аспекте. Чтобы придать понятию при-
чинной связи пространственно-временной вид, нужно найти предел
скоростей, и он был найден в постоянной скорости распространения
электромагнитного поля.
Обобщение, о котором идет речь, связано с новой трактовкой
условий тождественности движущегося объекта. Тождественным себе
может быть объект, движение которого подчинено условию: расстоя-
ние между точками а 41  и а 42 пребывания тела в моменты t 41 и t 42 не
должно быть больше, чем скорость света, умноженная на 4 t 41-t 42. Если
это условие не соблюдено, то перед нами не движущийся тождествен-
ный себе объект, а различные нетождественные объекты.
Обратимся теперь к динамическим выводам из существования
границы механических скоростей.
Если тело движется со скоростью, близкой к скорости света, и
на него начинает действовать дополнительная сила, то ускорение не
может быть таким, чтобы тело достигло скорости, превышающей ско-
рость света. Чем ближе к скорости света, тем больше тело сопро-
тивляется силе, тем меньшее ускорение вызывает одна и та же при-
ложенная к телу сила. Сопротивление тела ускорению, т.е. масса
тела, растет со скоростью и стремится к бесконечности, когда ско-
рость тела приближается к скорости света. Таким образом, масса
тела зависит от скорости его движения, она растет при растет при
возрастании скорости и пропорциональна энергии движения. Что ка-
сается массы покоящегося тела, она связана определенным отношени-
ем с внутренней энергией - энергией покоящегося тела. Эта энергия
равна массе покоя, умноженной на квадрат скорости света. Если
энергия движения тела переходит в его внутреннюю энергию (напри-
мер, тепловую энергию или энергию химических связей), от соот-
ветственно возрастанию энергии возрастает масса покоя.
Но масса покоя отнюдь не равна сумме заключенной в теле теп-
ловой, химической и электрической энергии, деленной на квадрат
скорости света. Этой сумме соответствует очень небольшая часть
всей энергии покоя. Переход энергии движения двух тел в энергию
покоя, например при неупругом соударении этих тел, увеличивает
энергию на ничтожную величину по сравнению со всей энергией по-
коя. В свою очередь переход теплоты в энергию движения тел умень-
шает энергию покоя (и массу покоя) на ничтожную долю. Тело с тем-
пературой, равной абсолютному нулю, с нулевой химической и элект-
рической энергией обладало бы энергией покоя и массой покоя, лишь
в ничтожной мере уменьшившимися по сравнению с телом обычной тем-
пературы и с обычными запасами химической и электрической энер-
гии.
До середины нашего столетия во всех областях техники исполь-
зовали лишь подобные ничтожные изменения энергии покоя и массы
покоя тел. Сейчас появились практически применяемые реакции, при
которых затрачивается или пополняется основной массив заключенной
в веществе энергии покоя.
В современной физике существует представление о полном пере-
ходе энергии покоя в энергию движения, т.е. о превращении части-
цы, обладающей массой покоя, в частицу с нулевой массой покоя и
очень большой энергией движения и массой движения. Такие переходы
наблюдаются в природе. До практического применения подобных про-
цессов еще далеко. Сейчас используются процессы, освобождающие
внутреннюю энергию атомных ядер. Атомная энергетика оказалась ре-
шающим экспериментальным и практическим доказательством теории
относительности Эйнштейна.
Разумеется в 1905 г., когда была опубликована первая статья
Эйнштейна о теории относительности, никто не мог предвидеть конк-
ретных путей научно-технической революции, призванной воплотить в
жизнь новое учение о пространстве, времени и движении. В теории
относительности видели поразительно глубокое, стройное и смелое
обобщение и истолкование уже известных экспериментальных данных,
прежде всего фактов, свидетельствующих о постоянстве скорости
света, о ее независимости от прямолинейного и равномерного движе-
ния системы, через которую проходит световой луч.
Вместе с тем ученые понимали, что, отвергнув, казалось бы
очевидное, классическое понятие одновременности, отказавшись от
не менее очевидного классического правила сложения скоростей, до-
пуская и обсуждая парадоксальные, на первый взгляд, выводы, физи-
ка овладевает очень мощным оружием.
Покинув пристань ньютоновской механики, бросив вызов "оче-
видности", не ограничивая отныне свои пути традиционным фарвате-
ром, наука может открыть новые берега. Какие плоды зреют на этих
берегах, что получит практика от новых теоретических обобщений,
тогда еще не знали. Существовала лишь, как уже было сказано, ин-
туитивная уверенность, что смелости и широте новых идей должны
соответствовать некоторые коренные технические культурные сдвиги.
Как бы то ни было, дело было сделано. В науку были пущены
идеи, которым предстояло революционизировать учение о космосе и
микромире, учение о движении и энергии, представление о прост-
ранстве и времени, а впоследствии стать основой атомной энергети-
ки. Эти идеи стали жить своей жизнью.
В 1907-1908 гг. Герман Миньковский (1864 - 1908) придал тео-
рии относительности весьма стройную и важную для последующего
обобщения геометрическую форму. В статье "Принцип относительнос-
ти" (1907) и в докладе "Пространство и время" (1908) теория Эйн-
штейна была сформулирована в виде учения об инвариантах четырех-
мерной евклидовой геометрии. У нас нет сейчас ни возможности, ни
необходимости давать сколько-нибудь строгое определение инвариан-
та и присоединить что-нибудь новое к тому, что уже было о нем
сказано. Понятие многомерного пространства, в частности четырех-
мерного пространства, также не требует здесь строгого определе-
ния; можно ограничиться самыми краткими пояснениями.
Ранее уже говорилось, что положение точки на плоскости может
быть задано двумя числами, измеряющими длины перпендикуляров,
опущенных на оси некоторой координатной системы. Если перейти к
иной системе отсчета, координаты каждой точки изменятся,но расс-
тояние между точками при таком координатном преобразовании не
изменятся. Инвариантность расстояний при координатных преобразо-
ваниях может быть показана не только в геометрии на плоскости, но
и в трехмерной геометрии. При движении геометрической фигуры в
пространстве координаты точек меняются, а расстояния между ними
остаются неизменными. Как уже было сказано, существование инвари-
антов координатных преобразований можно назвать равноправностью
систем отсчета, равноценностью точек, в каждой можно поместить
начало координатной системы, причем переход от одной системы к
другой не сказывается на расстояниях между точками. Подобная рав-
ноценность точек пространства называется его однородностью. В
сохранении формы тел и соблюдении неизменных законов их взаимо-
действия при преобразованиях выражается однородность пространс-
тва. Однако при очень больших скоростях, близких к скорости све-
та, становится очень существенной зависимость расстояния между
точками от движения системы отсчета. Если одна система отсчета
движется по отношению к другой, то длина стержня, покоящегося в
одной системе, окажется уменьшенной при измерении ее в другой
системе. В теории Эйнштейна пространственные расстояния (как и
промежутки времени) меняются при переходе от одной системы отсче-
та к другой, движцщейся относительно первой. Неизменной при таком
переходе остается другая величина, к которой мы и перейдем.
Миньковский сформулировал постоянство скорости света следую-
щим образом.
При координатном преобразовании остается неизменным расстоя-
ние между двумя точками, например путь, пройденный движущейся
частицей. Чтобы вычислить это расстояние - путь, пройденный час-
тицей, - нужно взять квадраты приращений трех координат, т.е.
квадраты разностей между новыми и старыми значениями координат.
Согласно соотношениям геометрии Евклида, сумма этих трех квадра-
тов будет равна квадрату расстояния между точками.
Теперь мы прибавим к трем приращениям пространственных коор-
динат приращение времени - время, прошедшее от момента пребывания
частицы в первой точке до момента пребывания ее во второй точке.
Эту четвертую величину мы также берем в квадрате. Нам ничто не
мешает назвать сумму четырех квадратов квадратом "расстояния", но
уже не трехмерного, а четырехмерного. При этом речь идет не о
расстоянии между пространственными точками, а об интервале между
пребыванием частицы в определенный момент в одной точке и и пре-
быванием частицы в другой момент в другой точке. Точка смещается
и в пространстве и во времени. Из постоянства скорости света вы-
текает, как показал Миньковский, что при определенных условиях
(время нужно измерять особыми единицами) четырехмерный пространс-
твенно-временной интервал будет неизменным, в какой бы системе
отсчета мы ни измеряли положения точек и время пребывания частицы
в этих точках.
Само по себе четырехмерное представление движения частицы
может быть легко усвоено, оно кажется почти очевидным и, в сущ-
ности привычным. Всем известно, что реальные события определяются
четырьмя числами: тремя пространственными координатами и време-
нем, прошедшим до события с начала летосчисления, или с начала
года, или от начала суток. Будем откладывать на листе бумаги по
горизонтальной прямой место какого-либо события - расстояние это-
го места от начального пункта, например расстояние до точки, дос-
тигнутой поездом, от станции отправления. По вертикальной оси от-
ложим время, когда поезд достиг этой точки, измеряя его с начала
суток или с момента выхода поезда со станции отправления. Тогда
мы получим график движения поезда в двумерном пространстве, на
географической карте, лежащей на столе, а время показывать верти-
калями над картой. Тогда мы не обойдемся чертежом, пнадобится
трехмерная модель, например проволока, укрепленная над картой.
Она будет трехмерным графиком движения: высота проволоки в каждой
точке над лежащей картой будет изображать время, а на самой карте
проекция проволоки изобразит движение поезда по местности.
Изобразим теперь не только перемещение поезда на плоскости,
но и его подъемы и спуски, т.е. его движение в трехмерном прост-
ранстве. Тогда вертикали уже не могут изобразить время, они будут
означать высоту поезда над уровнем моря. Где е откладывать время
- четвертое измерение? Четырехмерный график нельзя построить и
даже нельзя представить себе. Но математика уже давно умеет нахо-
дить подобные геометрические величины, пользуясь аналитическим
методом, производя вычисления. В формулы и вычисления наряду с
тремя пространственными измерениями можно ввести четвертое - вре-
мя и, отказавшись от наглядности,создать таким образом четырех-
мерную геометрию.
Если бы существовала мгновенная передача импульсов и вообще
сигналов, то мы могли бы говорить о двух событиях, происшедших
одновременно, т.е. отличающихся только пространственными коорди-
натами. Связь между событиями была бы физическим прообразом чисто
пространственных трехмерных геометрических соотношений. Но, как
уже говорилось, Эйнштейн в 1905 г. отказался от понятий абсолют-
ной одновременности и абсолютного, независимого от течения време-
ни. Теория Эйнштейна исходит из ограниченности и относительности
трехмерного, чисто пространственного представления о мире и вво-
дит более точное пространственно-временное представление. С точки
зрения теории относительности в картине мира должны фигурировать
четыре координаты и ей должна соответствовать четырехмерная гео-
метрия.
В 1908 г. Миньковский представил теорию относительности в
форме четырехмерной геометрии. Он назвал пребывание частицы в
точке, определенной четырьмя координатами, "событием", так как
под событием в механике следует понимать нечто определенное в
пространстве и во времени - пребывание частицы в определенной
пространственной точке в определенный момент. Далее он назвал со-
вокупность событий - пространственно-временное многообразие -
"миром", так как действительный мир развертывается в пространстве
и во времени. Линию, изображающую движение частицы, т.е. четырех-
мерную линию,каждая точка которой определяется четырьмя координа-
тами, Миньковский назвал "мировой линией".
Длина отрезка "мировой линии" инвариантна при переходе от
одной системы отсчета к другой, прямолинейно и равномерно движу-
щейся по отношению к первой. В этом и состоит исходное утвержде-
ние теории относительности, из него можно получить все ее соотно-
шения.
Следует подчеркнуть, что геометрические соотношения, с по-
мощью которых Миньковский изложил теорию относительности, подчи-
няются Евклидовой геометрии. Мы можем получить соотношения теории
относительности, предположив, что четырехмерное "расстояние" вы-
ражается таким же образом через четыре разности - три разности
пространственных координат и время, прошедшее между событиями, -
как и трехмерное расстояние выражается в евклидовой геометрии че-
рез разности пространственных координат. Для этого, как уже гово-
рилось, необходимо только выразить время в особых единицах. Длина
отрезка мировой линии определяется по правилам евклидовой геомет-
рии, только не трехмерной, а четырехмерной. Ее квадрат равен сум-
ме четырех квадратов приращений пространственных координат и вре-
мени. Иными словами, это - геометрическая сумма приращений четы-
рех координат, из которых три - пространственные, а четвертая -
время, измеренное особыми единицами. Мы можем назвать теорию от-
носительности учением об инвариантах четырехмерной евклидовой ге-
ометрии. Поскольку время измеряется особыми единицами, то говорят
о псевдоевклидовой четырехмерной геометрии.
Сумма квадратов четырех приращений - квадрат четырехмерного
расстояния между событиями, квадрат длины отрезка мировой линии -
не меняется при переходе от системы K к движущейся по отношению к
ней системе K'. Четырехмерное "расстояние"является инвариантом
преобразований четырехмерной геометрии, соответствующих переходу
от одной системы отсчета K к другой системе K', движущейся отно-
сительно первой прямолинейно и равномерно. Инвариантность следует
из неизменности скорости света при переходе от K к K'.
В этой инвариантности выражается однородность четырехмерного
мира. Выше говорилось, что в инвариантности длины трехмерного от-
резка при переносе начала координат выражается однородность трех-
мерного пространства. Теперь мы можем инвариантность четырехмер-
ного отрезка мировой линии рассматривать как45 выражение однород-
ности и изотропности четырехмерного пространства-времени.
Однородность пространства выражается в сохранении импульса,
а однородность времени - в сохранении энергии. Можно ожидать, что
в четырехмерной формулировке закон сохранении импульса и закон
сохранения энергии сливаются в один закон сохранения энергии и
импульса. Действительно, в теории относительности фигурирует та-
кой объединенный закон импульса.
Однородность пространства-времени означает, что в природе
нет выделенных пространственно-временных мировых точек. Нет собы-
тия, которое было бы абсолютным началом четырехмерной, пространс-
твенно-временной системы отсчета. В свете идей, изложенных Эйн-
штейном в 1905 г., четырехмерное расстояние между мировыми точка-
ми, т.е. пространственно-временной интервал не будет меняться при
совместном переносе этих точек вдоль мировой линии. Это значит,
что пространственно-временная связь двух событий не зависит от
того, какая мировая точка выбрана в качестве начала отсчета, и
что любая мировая точка может играть роль подобного начала.
Однородность пространства стала исходной идеей науки после
того, как Галилей и Декарт, сформулировав принцип инерции и прин-
цип сохранения импульса, показали, что в мировом пространстве нет
выделенной точки - начала привилегированной системы отсчета, что
расстояния между телами и их взаимодействия не зависят от движе-
ния состоящей из этих тел материальной системы. Однородность вре-
мени стала исходной идеей науки после того, как физика XIX века,
сформулировав принцип сохранения энергии, показала независимость
процессов природы от их смещения во времени и отсутствие абсолют-
ного начала отсчета времени. Теперь исходной идеей науки стано-
вится однородность пространства-времени.
Таким образом, идея однородности является стержневой идеей
науки XVII-XX вв. Она последовательно обобщается, переносится с
пространства на время, и далее, на пространство-время.
В отличие от известной классической физике однородности
пространства и времени, взятых порознь, однородность пространс-
тва-времени была бы нарушена, если бы в некоторой области проис-
ходила мгновенная передача сигнала. Примером могла бы служить аб-
солютно твердая частица, целиком заполняющая занятый ею объем
пространства и неспособная к деформации. Через занятое такой час-
тицей пространство импульс передавался бы мгновенно, и мы, таким
образом, столкнулись бы с физическим эквивалентом трехмерной гео-
метрии, с пространством, существующим независимо от времени.
В 1911-1916 гг. Эйнштейн создал общую теорию относительнос-
ти. Теория, созданная в 1905 г., называется специальной теорией
относительности, так как она справедлива лишь для специального
случая, прямолинейного и равномерного движения. Распространение
света, как и вообще, все механические и электродинамические про-
цессы, протекает неизменным образом, если перейти от покоящейся
системы K к к системе K', движущейся по отношению к К прямолиней-
но и равномерно. Поэтому, не выходя за пределы движущейся системы
нельзя зарегистрировать ее прямолинейное и равномерное движение,
ни механическим, ни оптическими (электродинамическими) опытами. В
системе, движущейся прямолинейно и равномерно, движение не вызы-
вает внутренних эффектов. В поезде, движущемся без ускорения, не
происходит ничего, что продемонстрировало бы пассажирам его дви-
жение. Это движение имеет относительный смысл, поезд движется от-
носительно Земли и находящихся на Земле неподвижных предметов. С
тем же правом можно сказать, что Земля движется относительно по-
езда; нельзя найти такие явления в поезде, которые указывают на
неравноценность этих двух утверждений. Иное дело - ускоренное
движение. В связи с ньютоновым понятием абсолютного движения уже
говорилось, что пассажир убеждается в ускорении поезда, ощущая
толчок, вызванный силой инерции и направленный назад, когда поезд
набирает скорость, и вперед, когда машинист начинает торможение и
поезд теряет скорость. Таким образом, ускоренное движение создает
внутренние эффекты в движущейся системе.
В этом случае уже как будто нельзя говорить о равномерности
движущихся систем. Если движение поезда относить к Земле, т.е.
считать Землю неподвижной, то ускорение поезда приводит к толчку;
если же считать неподвижным поезд и считать, что поверхность Зем-
ли с ускорением движется относительно поезда, то находящийся в
поезде пассажир не почувствует толчка. Таким образом, фраза "по-
езд движется относительно Земли" и фраза "Земля движется относи-
тельно поезда" в случае ускоренного движения имеют различный фи-
зический смысл: они описывают различные ситуации, сопровождающие-
ся различными эффектами. Поэтому принцип относительности применим
лишь к равномерному и прямолинейному движению, движению по инер-
ции. Ускоренное движение не подчинено этому принципу, в силу чего
теория относительности, выдвинутая Эйнштейном в 1905 г., и назы-
вается специальной теорией относительности.
Долгие годы у Эйнштейна созревала мысль о подчинении уско-
ренного движения принципу относительности и создании общей теории
относительности, рассматривающей не только инерционные, но и все-
возможные движения. Является ли толчок при ускорении или замедле-
нии поезда, иными словами - сила инерции, действующая на пассажи-
ра, абсолютнымпризнаком движения? Не может ли возникнуть в не-
подвижном поезде сила, которую нельзя отличить от силы инерции?
Сила инерции действует единообразно на все предметы, находя-
щиеся в поезде. Когда локомотив придаст поезду резкое ускорение,
все находящиеся в поезде предметы с одним и тем же ускорением,
обязанным силе инерции, будут стремиться в сторону, противополож-
ную движению поезда.Существует сила, которая также действует еди-
нообразно на все тела. Это - сила тяжести.
Если бы дорога имела очень крутые подъемы, мы не смогли бы
определить, что именно толкает назад пассажиров и их вещи - сила
тяжести, действующая на них, когда поезд, движущийся равномерно
по полотну дороги,поднимается в гору, или сила инерции, действую-
щая на поезд, испытывающий в этот момент ускорение на равнине.
Обе они действуют единообразно, поскольку инертная масса тела
пропорциональна его весу.
Эйнштейн говорил не о поезде, а о кабине лифта. Представим
себе, что кабина поднимается с ускорением вверх, причем сила тя-
жести в это время не действует на кабину.
Сила инерции будет толкать людей в сторону, противоположную
ускорению кабины, т.е. вниз, и будет прижимать подошвы людей к
полу кабины. Сила инерции толкнет по направлению к полу подвешен-
ные к потолку кабины грузы и потянет нити, на которых эти грузы
подвешены. Но является ли это доказательством ускоренного движе-
ния кабины? Нет, в неподвижной кабине, испытывающей действие зем-
ного тяготения, те же эффекты производятся силой тяжести.
Эйнштейн назвал принципом эквивалентности утверждение о рав-
ноценности силы тяжести, действующей на систему, и силы инерции,
проявляющейся при ускоренном движении. Этот принцип позволяет
рассматривать ускоренное движение как относительное. В самом де-
ле, проявления ускоренного движения (силы инерции) ничем не отли-
чаются от сил тяжести в неподвижной системе. Значит, нет внутрен-
него критерия движения, и о движении можно судить лишь по отноше-
нию к внешни телам. Движение, в том числе ускоренное движение те-
ла A, состоит в изменении расстояния от некоторого тела отсчета
B, причем мы с тем же правом можем утверждать, что B движется от-
носительно A.
Но чтобы принцип эквивалентности позволил рассматривать ус-
коренное движение как относительное, необходима одна чрезвычайно
важная физическая предпосылка. Пусть кабину лифта пересекает све-
товой луч. Когда кабина поднимается, свет, попав в кабину через
боковое окошечко, достигает противоположной стены несколько ниже:
пока свет пересечет кабину, она уйдет вверх. Когда кабина непод-
вижна и находится в поле тяготения, подобный эффект будет иметь
место, если тяготение действует и на свет, т.е. если свет облада-
ет тяжелой массой.
Этот вывод был очень важным моментом в развитии теории отно-
сительности. Математические расчеты и условные картины привели к
заключению, которое могло быть проверено экспериментом. В истории
физики известен опыт "взвешивания света" - наблюдение искривления
светового луча вблизи Солнца. Задолго до этой проверки Эйнштейну
пришлось решить другую теоретическую проблему.
Дело в том, что действующие на систему тяготение и ускорение
системы вызывает один и тот же эффект только тогда, когда силы
тяжести увлекают тела в одном и том же направлении, по параллель-
ным линиям. Но лишь в очень малых областях направления силы тя-
жести можно считать параллельными. В больших областях силы тяжес-
ти действуют по различным направлениям, и это создает существен-
ное различие между эффектом тяжести и эффектом ускорения системы.
Вернемся к кабине лифта. При ее ускоренном подъеме нити, натяну-
тые подвешенными грузами, будут параллельны. Тяжесть же натянет
их по направлениям, строго говоря, не параллельным, а пересекаю-
щимся в центре Земли. В кабине лифта этим различием можно пренеб-
речь. Но если бы кабина лифта имела в поперечнике несколько сотен
километров, различие стало бы заметным. Тем самым была бы наруше-
на эквивалентность тяготения и ускорения и мы получили бы абсо-
лютный критерий ускоренного движения в виде параллельного движе-
ния нитей.
Как же распространить принцип относительности на ускоренные
движения в больших областях? В поисках ответа на этот вопрос Эйн-
штейн пришел к идее, которая резко отличается по своему характеру
от классических идей. Она отличается от них не только по содержа-
нию, по физическому смыслу, по лежащему в ее основе представлению
о мире.Общая теория относительности открыла собой новую полосу в
истории науки еще и потому, что она изменила соотношение между
геометрическими и собственно физическими построениями. Раньше, до
Эйнштейна, эти построения не сливались в единую теорию. Под гео-
метрией когда-то подразумевали совокупность раз навсегда данных
абсолютно бесспорных и непоколебимых теорем, выводимых из аксиом
и постулатов, сформулированных в древности Евклидом. Потом узнали
о возможности иных, неевклидовых геометрий, допускающих неравенс-
тво суммы углов треугольника двум прямым углам, пересечение пер-
пендикуляров, восстановленных из двух точек на одной и той же
прямой, расхождение перпендикуляров к одной и той же прямой и
другие соотношения, противоречащие евклидовой геометрии. Уже Ло-
бачевский, как мы знаем, предполагал, что физические процессы в
пространстве могут придать ему неевклидовы геометрические свойс-
тва.
Эйнштейн отождествил тяготение, искривляющее мировые линии
движущихся тел, с искривлением пространства-времени. Эта идея
всегда будет образцом смелости и глубины физической мысли и вмес-
те с тем образцом нового характера научного мышления, находящего
реальные физические эквиваленты евклидовых и неевклидовых геомет-
рических соотношений.
Тело, предоставленное самому себе, движется по прямой в
трехмерном пространстве. Оно движется по прямой в четырехмерном
пространственно-временном мире, так как на графике "пространс-
тво-время" каждый сдвиг по оси времени (каждое приращение време-
ни) сопровождается одним и тем же приращением пройденного прост-
ранственного расстояния. Таким образом, движениям по инерции со-
ответствуют прямые мировые линии, т.е. прямые четырехмерного
пространства-времени. ускоренным движениям соответствуют кривые
мировые линиичетырехмерного пространственно-временного мира.
Тяготение сообщает телам одно и то же ускорение. Оно сообща-
ет такое же ускорение и свету. Следовательно, тяготение искривля-
ет мировые линии. Если бы прямые, начерченные на плоскости, вдруг
оказались кривыми, причем обрели бы одну и ту же кривизну, мы
предположили бы, что плоскость искривилась, стала искривленной
поверхностью, например поверхностью шара.Быть может, тяготение,
единообразно искривляющее мировые линии, означает, что пространс-
тво-время в данной мировой точке (в данном пространственном пунк-
те и в данный момент времени) приобрело определенную кривизну.
Изменение сил тяготения, изменение интенсивности и направления
тяжести, можно тогда рассматривать как изменение кривизны прост-
ранства-времени.
Кривизна линии не требует пояснения. Кривизна поверхности
также вполне наглядное представление. Мы знаем, что на кривой по-
верхности, например поверхности земного шара, теоремы евклидовой
геометрии на плоскости перестают быть справедливыми. Вместо пря-
мых кратчайшими линиями становятся иные геодезические линии, нап-
ример в случае поверхности шара дуги большого круга: чтобы чтобы
проехать кратчайшим путем с севера на юг, нужно двигаться по дуге
меридиана. На геодезическую линию, заменяющую собой прямую, из
одной точки можно опустить множество различных перпендикуляров,
например из полюса на экватор. Мы не можем себе представить наг-
лядно кривизну трехмерного пространства. Но мы можем назвать кри-
визной отступление трехмерного мира от геометрии Евклида. То же
самое мы можем сделать с четырехмерным многообразием.
Повторим исходные положения общей теории относительности.
В каждой точке, находящейся в поле действия сил тяготения
какой-либо большой массы, например Солнца, все тела падают с оди-
наковым ускорением, и не только тела, но и свет также приобретает
ускорение, причем одно и то же ускорение, зависящее от массы
Солнца. В четырехмерной геометрии подобное ускорение может быть
представлено в виде пространственно-временного мира. Согласно об-
щей теории относительности, наличие тяжелых масс искривляет прос-
транственно-временной мир, и это искривление выражается в тяготе-
нии, изменяющем пути и скорости тел и световых лучей.
В 1919 году астрономические наблюдения подтвердили теорию
тяготения Эйнштейна - общую теорию относительности. Лучи звезд
искривляются, проходя мимо Солнца, и их отклонения от прямого пу-
ти оказались такими, какие были вычислены теоретически Эйнштейном.
Кривизна пространства-времени меняется в зависимости от
распределения тяжелых масс. Если отправиться в путь через Вселен-
ную, не меняя направления, т.е. следуя геодезическим линиям окру-
жающего пространства, то нам встретятся на пути четырехмерные
пригорки - гравитационные поля планет, горы - гравитационные поля
звезд, большие хребты - гравитационные поля галактик. Путешествуя
подобным образом по поверхности Земли, мы, помимо холмов и гор,
знаем о кривизне земной поверхности в целом и уверены, что, про-
должая путь в неизменном направлении, например вдоль экватора,
вернемся к месту, откуда выехали.
При путешествии во Вселенной мы также сталкиваемся с общей
кривизной пространства, которая так относится к гравитационным
полям планет, звезд и галактик, как кривизна Земли к рельефу ее
поверхности. Если бы искривлено не только пространство, но и вре-
мя, мы вернулись бы в результате космического путешествия в ис-
ходный пространственный путь и в исходное пространственное поло-
жение. Это невозможно. Эйнштейн предположил, что искривлено лишь
пространство.
В 1922 г. А.А.Фридман (1888-1925) выдвинул гипотезу об изме-
нении радиуса общей кривизны пространства с течением времени. Не-
которые астрономические наблюдения подтверждают эту гипотезу -
расстояния между галактиками увеличивается со временем, галактики
разбегаются. Однако космологические концепции , связанные с общей
теорией относительности, еще очень далеки от той определенности и
однозначности, которая свойственна специальной теории относитель-
ности.