

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЕ МИРА: ПРИНЦИПЫ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

8.3. Пространство и время в специальной теории относительности

В 1905 г. А. Эйнштейн обобщил выводы классической механики Галилея — Ньютона и электродинамики Максвелла — Лоренца и на этой основе создал специальную теорию относительности (СТО), которая описывает законы физических процессов при скоростях движения тел, близких к скорости света. Теория названа «специальной» для того, чтобы показать: она применима лишь для таких специальных условий, при которых не учитывается действие поля тяготения, а движение тел является равномерным и прямолинейным.

Построение А. Эйнштейном в 1905 г. теории относительности не было единичным гениальным прозрением. Необходимо было совершить *последовательную цепочку открытий*, каждое из которых могло бы обессмертить имя своего автора:

- убедиться в атомарной структуре материи (на основе объяснения броуновского движения);
- пересмотреть закон равномерного распределения энергии по степеням свободы;
- предположить возможность распространения света в виде частиц- фотонов;
- полностью отказаться на этом основании от концепции эфира;
- предложить общий «запрещающий» принцип — запрет скоростей, больших скорости света;
- объединить принципы относительности в механике и в электродинамике.

Такая серия гениальных открытий, совершенных одним человеком за один год, не имеет аналогов в истории науки. Ни Лоренц, ни Пуанкаре не смогли осуществить такую программу, поскольку не смогли освободиться от концепций эфира. Они — предшественники Эйнштейна, однако лавры творца теории относительности принадлежат только ему.

Явления, описываемые в СТО и называемые релятивистскими (от лат. *relatio* — отношение), проявляются при скоростях движения тел, близких к скорости света в вакууме $c = (2,99792458) \times 10^{10}$ см/с, или округленно — 300 000 км/с.

В основу СТО положен *обобщенный принцип относительности*: никакими физическими опытами (в том числе электромагнитными — это существенное дополнение к механическому принципу относительности Галилея — Ньютона), производимыми внутри данной системы отсчета, нельзя установить различие между состояниями покоя и равномерного прямолинейного движения.

Эйнштейн сформулировал два постулата:

1. Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, движущихся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, эти изменения относятся.

2. Каждый луч света движется в «покоящейся» системе координат с определенной скоростью V , независимо от того, испускается ли этот луч света покоящимся или движущимся телом».

Из этих постулатов следовала независимость скорости света от движения источника для любой инерциальной системы отсчета. В основе преобразований Эйнштейна лежит принцип *равноправия всех инерциальных систем отсчета*. Если физическая система B движется равномерно и прямолинейно со скоростью V относительно системы A , то так же справедливо считать, что A движется относительно B со скоростью V . Таким образом, смысл термина «принцип относительности» связан с тем, что в системе движущихся тел все *относительные движения* этих тел остаются неизменными вне зависимости от того, какое из них выбрано в качестве точки отсчета.



Таким образом, А. Эйнштейн показал:

- Для всех физических процессов скорость света обладает свойством бесконечной скорости в том смысле, что достичь этой скорости не может ни одно физическое тело, обладающее массой покоя (специфика фотона, как кванта света, или кванта электромагнитного поля, состоит в том, что он массой покоя не обладает). Она не может складываться ни с какой скоростью и для всех инерциальных систем оказывается постоянной.
- Для придания телу скорости, равной скорости света, требуется бесконечное количество энергии, поскольку само тело приобретает массу, стремящуюся к бесконечности. Экспериментально этот факт подтвержден измерениями, которые проводились над электронами: выяснилось, что кинетическая энергия точечной массы

микрочастицы растёт быстрее, нежели квадрат ее скорости, и становится бесконечной для скорости, равной скорости света.

- Физические величины длины тела, промежутка времени, массы для разных систем отсчета различны. *Длина тела* в движущейся системе сокращается по отношению к длине тела в покоящейся системе отсчета по формуле

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

где l — длина тела в движущейся системе со скоростью v по отношению к неподвижной системе; l_0 — длина тела в покоящейся системе; c — скорость света.

Время в движущейся системе замедляется по сравнению с неподвижной системой, и замедляется тем больше, чем ближе скорость системы к скорости света по формуле

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

где t — промежуток времени в покоящейся системе, t' — промежуток времени в движущейся системе. Этот эффект часто называют *эффектом замедления хода движущихся часов*.

Формулы Эйнштейна совпадают с преобразованиями Лоренца. Поэтому иногда по адресу Эйнштейна говорят, что он просто использовал эти преобразования в своей теории. Но сам Лоренц в 1912 г. отметил, что ему «не удалось в полной мере получить формулу преобразования теории относительности Эйнштейна... Заслуга Эйнштейна состоит в том, что он первый высказал принцип относительности в виде всеобщего строго и точно действующего закона». Если теория Лоренца была последней попыткой *спасти идею эфира* (даже крупные исследователи не приняли идею «без-эфирной Вселенной»), то СТО убедительно *опровергла само существование эфира*.

Существенные отличия СТО от субстанциональной концепции пространства и времени Ньютона обнаруживаются лишь при релятивистских скоростях. При скоростях, существенно меньших скорости света, формулы СТО переходят в формулы классической механики Ньютона, поскольку подкоренное выражение стремится к единице.

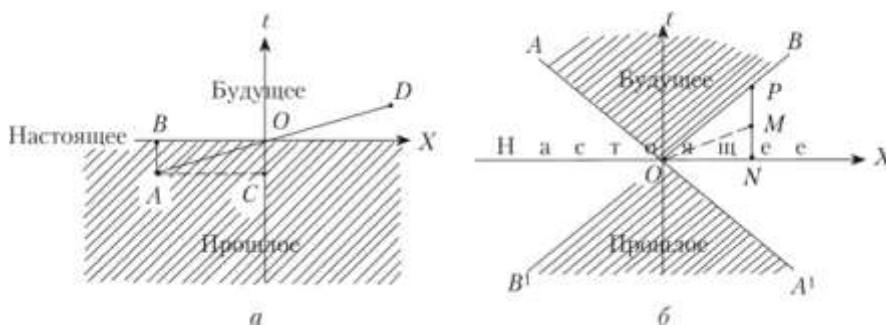
Эйнштейн попытался дать наглядное выражение замедления времени на примере железнодорожной платформы, мимо которой проходит поезд со скоростью, близкой к скорости света.

Итог: при одной и той же скорости света c световой луч в вагоне проходит гораздо меньший путь, чем световой луч, рассматриваемый относительно неподвижной платформы, а отрезок времени в движущемся вагоне гораздо короче, чем на неподвижной платформе, — время движущегося вагона замедляется.

Выводы СТО существенно меняют представления о взаимосвязи прошлого, настоящего и будущего. На рис. для случая одной пространственной (x) и одной временной (t) координаты любая точка — некоторое событие. Начальное событие - точка O . Для наблюдателя, находящегося там же, где происходит это событие, O будет событием «здесь-и-теперь».

Прошлое события O — множество событий, которые могли быть причиной изменений в O , поскольку причина всегда предшествует следствию. *Будущее* события O — множество событий, на которые может повлиять O . *Настоящее* — множество событий, которые не могут в принципе взаимодействовать с O , поскольку причины только возникают в настоящем, а для того, чтобы воздействовать на O , им требуется время, которое еще не наступило, — оно будет в будущем. Поэтому зона настоящего как бы сосуществует с O . В определении прошлого, настоящего и будущего важную роль играет *скорость причинного воздействия*, которая в классической физике Ньютона может быть сколь угодно велика — вплоть до бесконечности.

Поэтому *все* события ниже оси X — прошлые по отношению к O . Аналогичны рассуждения для будущих событий, например, D .



a — классическая механика (Ньютон); b — специальная теория относительности (Эйнштейн)

«Мировая линия» — линия, на которой лежат все события некоторого непрерывного процесса. Так, процесс распространения воздействия из A в O изображается мировой линией AO . Чем ближе мировая линия к оси X (чем меньше угол AOB), тем больше скорость рассматриваемого процесса. В классической физике возможны мировые линии, сколь угодно близкие к оси X .

Иная картина возникает в СТО. Ни одно воздействие не может распространяться с большей скоростью, чем скорость света. Поэтому область настоящего выходит за пределы оси X и занимает более обширную зону (см. рис. 8.4). В основе структуры пространства-времени СТО лежит «световой конус», образуемый на рисунке линиями AA^1 и BB^1 . Эти мировые линии соответствуют процессу распространения светового сигнала влево и вправо по оси X . Все, что лежит вне светового конуса (незаштрихованная часть на), не может взаимодействовать с O , поскольку нельзя *превысить скорость света*.

Так, чтобы O смогло воздействовать на событие M , воздействие должно пройти расстояние ON за время MN , при этом время MN существенно меньше времени NP . Но световой луч проходит расстояние ON именно за время NP , и никакой реальный физический процесс не может осуществиться за меньшее время. Таким образом, незаштрихованная зона представляет собой как бы область настоящего, поскольку через нее не проходит ни одна мировая линия реального физического объекта.

В нижней части светового конуса $BЮA$ расположены события, которые в принципе могут воздействовать на O , это — зона прошлого. Верхняя часть светового конуса — зона будущего. Все реальные мировые линии, проходящие через точку O , лежат внутри мирового конуса, который представляет собой, по образному выражению британского астрофизика

А. Эддингтона (1882—1944), как бы «ствол Вселенной». Рассмотренная картина мира изложена в 1908 г. немецким математиком Г. Минковским (1864—1909) и стала общепризнанной. Поэтому пространственно-временное многообразие СТО называют «миром (пространством) Минковского».

С позиций здравого смысла понятно, что время длится, а пространство простирается в трех измерениях. В теории относительности вводится представление о *единой четырехмерной пространственно-временной протяженности S* , которая измеряется особыми пространственно-временными интервалами между событиями:

$$S^2 = c^2t^2 - (x^2 + y^2 + z^2),$$

где c — скорость света, t — время, x, y, z — координаты пространства.

В четырехмерном пространстве Минковского к обычным трем координатам пространства добавляется четвертая, равная ct , где c — скорость света, t — время события.

В апреле 1921 г. корреспондент газеты «*Нью-Йорк Таймс*» спросил Эйнштейна о сути его теории относительности. Последовал ответ: «Суть такова: раньше считали, что если каким-нибудь чудом все материальные вещи исчезли бы вдруг, то пространство и время остались бы. Согласно же теории относительности вместе с вещами исчезли бы и пространство, и время».

Таким образом, у Эйнштейна пространство и время перестают быть абсолютными субстанциями и становятся относительными *свойствами (характеристиками) движущихся тел*, именно поэтому они и могут исчезнуть вместе с исчезновением движущихся тел.

8.4. Общая теория относительности

Эйнштейн вспоминал: «Я сидел в кресле в бернском патентном бюро, как вдруг мне в голову пришла мысль: «В свободном падении человек не ощущает своего веса!» Я был поражен. Эта простая мысль произвела на меня огромное впечатление. Развив ее, я пришел к теории тяготения».

В общей теории относительности рассматриваются уже не только инерциальные системы отсчета (т.е. покоящиеся или движущиеся друг относительно друга равномерно и прямолинейно), но и системы, участвующие в других видах движения.

При стремлении скорости тела к скорости света масса тела стремится к бесконечности, поэтому все труднее и труднее придавать ему добавочное ускорение. В соответствии с этим нельзя достичь скорости света - для этого надо располагать бесконечной силой. Но фотон движется именно со скоростью света. Эйнштейн дает гениальный комментарий: свет невозможно остановить (как останавливают любое тело, обладающее массой), потому что масса покоя фотона равна нулю.

Свет распространяется по прямой линии с постоянной скоростью $c = 300\,000$ км/с лишь в инерциальных системах отсчета, описываемых СТО. Но относительно системы отсчета, которая движется с ускорением (или с замедлением), световой луч не может двигаться прямолинейно; в таком поле световые лучи распространяются по *геодезическим* линиям — кратчайшим расстояниям между двумя точками.

С математической точки зрения ОТО — сложная теория.

В общей теории относительности на смену закону тяготения Ньютона приходят *эйнштейновские уравнения тяготения*, предельным случаем которых выступает закон Ньютона. Из релятивистской формулы Эйнштейна для энергии следует, что при малых скоростях движения энергия тела равна

$$E = mc^2 + mv^2 / 2.$$

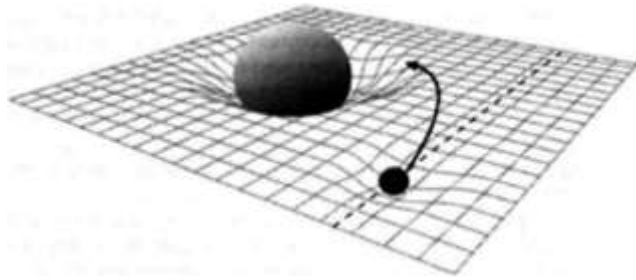
Второй член справа — кинетическая энергия, первый же член показывает, что покоящееся тело обладает запасом энергии

$E_n - mc^2$, — энергией покоя (так называемый принцип *эквивалентности энергии и массы*, или принцип эквивалентности Эйнштейна).

Очевидно, это — *самая знаменитая формула* в истории науки.

В ядерных реакциях и процессах превращений элементарных частиц значительная часть энергии покоя может переходить в кинетическую энергию частиц.

В общей теории относительности А. Эйнштейн доказал, что *структура пространства-времени определяется распределением масс материи*. Видный физик XX в. Дж. Уилер (1933—2008) так объяснил суть формул ОТО:



«Пространство говорит материи, как двигаться, а материя говорит пространству, как искривиться».

В упрощенной форме сущность ОТО можно выразить так: *траектория тела в гравитационном поле в четырехмерном пространстве Минковского принимает форму геодезической линии*. К примеру, движение планет можно интерпретировать следующим образом: поле звезды искривляет пространство, а планеты как бы катятся по геодезическим траекториям в этом искривленном

пространстве. В ОТО место физического поля занимает геометрия: если растянуть тонкий резиновый лист и поместить в его центр тяжелый шар, то резина под ним провиснет (аналогия искривленного пространства). Если теперь покатыть по этому листу маленький шарик, то сама поверхность будет тянуть его к впадине, а если эта впадина глубока, то шарик будет вращаться вокруг шара, образовавшего эту впадину.

Таким образом, ОТО разрешила противоречие между СТО и теорией тяготения Ньютона. У Ньютона тяготение передается мгновенно: если во Вселенной появится некоторое тело, то все остальные тела мгновенно почувствуют его тяготение. Но согласно СТО, никакое взаимодействие не может распространяться быстрее скорости света. Маленькому шарикку требуется некоторое время, чтобы докатиться по искривленному пространству до большого. Эйнштейн показал: скорость распространения кривизны пространства в точности равна c .

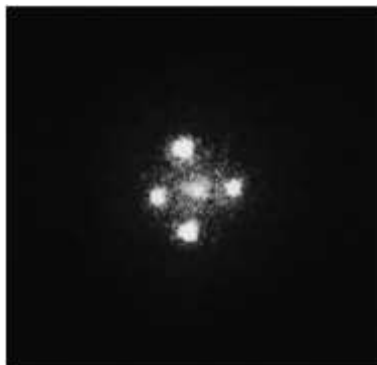
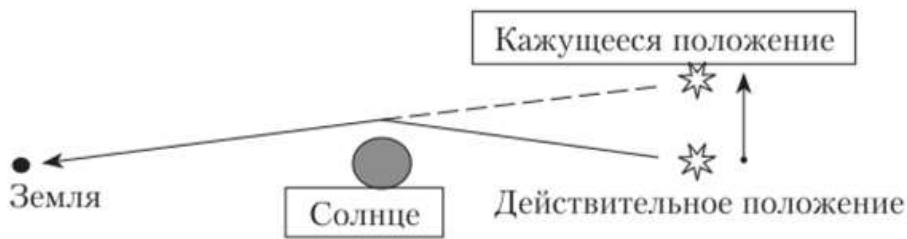
«Вселенная Минковского — это четырехмерный мир, чем-то похожий на мир Евклида. С созданием же Эйнштейном ОТО этот однородный мир превратился в холмистую страну, где холмы — вещество Вселенной, поскольку оно — один из самых ее существенных элементов, органично вписанный в пространство и наряду со временем составляющий ее неотъемлемую часть. Вещество не вносится откуда-то извне в пустой пространственный ящик, а составляет единое целое с его геометрией. *Время, пространство, вещество* — составляющие физического мира, являющиеся проявлением определенной геометрии»

Экспериментальные доказательства ОТО. Очень скрупулезная проверка соответствия инерционной и гравитационной масс была проведена, венгерским исследователем Л. фон Этвешем (1848—1919) в 1889—1908 гг. Тем самым доказана справедливость важнейшего принципа ОТО.

Другая проверка связана со смещением перигелия Меркурия. Лаверье обнаружил, что это смещение (38 угловых секунд за столетие) не укладывается в точную картину движения планет по Ньютону. Поскольку Меркурий — самая близкая к Солнцу планета, поэтому вращается в таком сильном поле тяготения, что уже заметны отклонения ее движения от того, каким оно должно было быть по закону Ньютона.

Орбита Меркурия (самой близкой к Солнцу планеты, движущейся поэтому в самом сильном, в сравнении с другими планетами, поле его тяготения), вращается относительно системы координат, связанной с Солнцем. Полный оборот этой орбиты происходит в течение 3 млн лет, что подтверждается расчетами ОТО.

Третья проверка связана с тем, что энергия световых лучей пропорциональна массе, поэтому гравитационное поле должно загигать световые лучи в свою сторону. Отклонение весьма мало, и в то время проверить его можно было только во время солнечного затмения. 19 мая 1919 г. экспедиция А. С. Эддингтона получила фотографии звезд во время солнечного затмения и выяснилось, что Эйнштейн полностью прав: лучи отклонялись точно на угол в 1,7 угловых секунд, предсказанный Эйнштейном.



Из относительно недавних проверок отметим *гравитационное линзирование*. Оно заключается в том, что вокруг массивных тел, таких как черные дыры, свет изгибается, подобно тому, как преломляется луч света, проходящий через линзу. Благодаря этому удастся изучать звезды и галактики, которые находятся за массивными небесными телами. В качестве яркого примера гравитационного линзирования выступает «Крест Эйнштейна», наблюдаемый в созвездии Пегаса. «Крест Эйнштейна» — расположившиеся в форме листа клевера копии изображения одной и той же звезды. А дают такой эффект гравитационные линзы, которые расположились между наблюдателем на земле и звездой.

Свойства пространства и времени.

Пространство и время объективны и реальны, т.е. существуют независимо от сознания людей и познания ими этой объективной реальности. В рамках физической картины мира они выступают в качестве универсальных, всеобщих форм бытия материи на микро-, макро- и мегауровнях. Не существует таких явлений, событий, предметов, которые находились бы вне пространства или вне времени.

Свойство *трехмерности* пространства означает, что положение любого предмета может быть точно определено только с помощью трех независимых координат. В конце XX в. было обосновано положение об 11 пространственно-временных измерениях в области микромира в первые моменты рождения нашей Вселенной: 10 — пространственных и 1 — временное. Затем из них возникает четырехмерный континуум (лат. *continuum* — непрерывное) макромира, остальные измерения оказываются «свернутыми» в микромире. Любой физический процесс происходит одним и тем же образом, если:

- осуществить его в любой другой точке пространства; эта симметрия выражает равноправие всех точек пространства, т.е. его *однородность* (отсутствуют выделенные точки пространства подобно Земле в геоцентрической системе мира);
- систему, в которой осуществляется физический процесс, повернуть на произвольный угол; эта симметрия выражает равноправие всех направлений в пространстве, т.е. *изотропность* пространства;
- повторить процесс через некоторый промежуток времени; эта симметрия выражает *однородность времени*. Однородность пространства, кроме прочего, означает, что в каждую его точку можно *возвращаться*; в этом смысле его однородность тождественна обратимости.

Напротив, однородность времени связана с тем, что время протекает только одним образом: из прошлого через настоящее к будущему. Поэтому время одномерно и *необратимо*: нельзя вернуться назад в какую-либо точку прошлого, но нельзя и «перепрыгнуть» через некоторый отрезок времени, и, минуя настоящее, оказаться в будущем.

Существует инвариантность законов природы по отношению к четырем типам преобразований: 1) переносу в пространстве; 2) вращению в пространстве; 3) сдвигу во времени; 4) преобразованию движения. Поэтому с конкретными свойствами пространства и времени тесно связаны важнейшие законы физики — *законы сохранения*, характеризующие такие свойства системы, которые не меняются в процессе преобразования некоторых переменных. В свою очередь, такого рода переменные служат выражением конкретного *вида симметрии*. Это демонстрирует известная теорема, которую доказала Эмми Нётер (1882—1935), немецкий математик. Согласно теореме Нётер каждое свойство симметрии пространства и времени можно сопоставить с конкретным законом сохранения:

- однородность времени характеризует симметрию относительно сдвига во времени, и ей соответствует *закон сохранения энергии*;
- однородность пространства характеризует симметрию относительно пространственного сдвига, и ей соответствует *закон сохранения импульса*. Импульс тела равен произведению его массы и скорости движения этого тела: $p = mv$;
- изотропность пространства характеризует симметрию по отношению поворота координатных осей, и ей соответствует *закон сохранения момента импульса*, или углового момента.

Момент импульса (кинетический момент, момент количества движения) характеризует *количество вращательного движения*. Он может быть определен как векторная физическая величина, направленная перпендикулярно плоскости, содержащей вектор импульса \vec{p} и радиус-вектор \vec{r} .

При таком определении момент импульса равен векторному произведению указанных векторов: $L = r \times mv$. Отмеченные законы трактуются как всеобщие, и до сих пор не найдено ни одного исключения. Считается также, что вся совокупность законов сохранения выражает субстанциальность движущейся материи, принцип ее несотворимости и неуничтожимости.

Идея А. Эйнштейна о том, что свойства пространства и времени тесно связаны с движением, логично приводит к мысли, что каждому виду движения соответствуют свои пространственно-временные характеристики. Именно поэтому в современной науке используются понятия *биологического, психологического у геологического, астрономического у социального* пространства и времени. Эти понятия отражают специфику проявления пространственно-временных свойств объектов, принадлежащих к разным сферам бытия материи. Метрические (количественные) и топологические (качественные) свойства пространства и времени в таких объектах могут быть существенно отличными.

Выводы

В ньютоновской картине мира пространство и время рассматривались обособленно от движения материальных тел. Движение при этом рассматривалось как независимое от систем отсчета.

С возникновением специальной теории относительности было установлено следующее.

1. Всякое движение может описываться только по отношению к другим телам, которые могут быть приняты за системы отсчета, связанные с определенной системой координат.

2. Пространство и время тесно взаимосвязаны друг с другом, поскольку только совместно они определяют положение движущегося тела.

3. СТО показала: законы механики сохраняют свою форму для всех галилеевых систем отсчета; точно так же сохраняют свою форму и законы электродинамики, однако при этом вместо преобразований Галилея используются преобразования Лоренца.

4. ОТО отказывается от требования рассматривать лишь инерциальные системы отсчета и приходит к выводу: все системы отсчета являются равноценными для описания законов природы. В ОТО установлена зависимость пространственно-временных свойств окружающего мира от расположения и движения тяготеющих масс.

Важнейший вывод ОТО о физической эквивалентности массы и энергии $E = mc^2$ приводит к идее, что вещество представляет собой огромную концентрацию энергии, а само понятие энергии выступает характеристикой поля. Нельзя ли, основываясь на этой идее, построить всю физику на едином понятии поля? Такая грандиозная программа была выдвинута А. Эйнштейном, но, к сожалению, она осталась незавершенной.