

СПЕЦИАЛЬНАЯ (СТО)

НЕЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СВЕТА ОТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ

Опыт Майкельсона 1881 г.

ИСТОЧНИК СВЕТА, ЗЕРКАЛА, СВЕТО-ДЕЛИТЕЛЬ, ТЕЛЕСКОП, «ЭФИРНЫЙ ВЕТЕР»?

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ЛЮБОЙ ПРОЦЕСС ПРОТЕКАЕТ ОДИНАКОВО

В СОСТОЯНИИ ПОКОЯ И РАВНОМЕРНОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

ПРОСТРАНСТВО X, Y, Z

ВВЕРХ Z > 0, НАЗАД X < 0, ВПРАВО Y > 0, ВЛЕВО Y < 0, ВПЕРЕД X > 0, ВНИЗ Z < 0

ОТ ГАЛИЛЕЯ К ЭЙНШТЕЙНУ

ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ X, Y, Z, t

ВВЕРХ Z > 0, НАЗАД X < 0, ВПЕРЕД X > 0, ВНИЗ Z < 0, ПРОШЛОЕ t < 0, БУДУЩЕЕ t > 0

ИНТЕРВАЛ ИНВАРИАНТЕН

СОБЫТИЕ А, СОБЫТИЕ В, S_{AB}

ОДНОВРЕМЕННОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНА

СОБЫТИЕ А, СОБЫТИЕ В, ЛУЧ СВЕТА

$$t'_A - t'_B = \gamma_{AB} \frac{v}{c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

ЛОРЕНЦЕВО СОКРАЩЕНИЕ

ЗАМЕДЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ

ПОЯВЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

H=0, E≠0 → H≠0, E≠0

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

ДАЛИНА ВОЛНЫ, НЕПОДВИЖНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ, ПРИБЛИЖАЮЩИЙСЯ НАБЛЮДАТЕЛЬ, УДАЛЯЮЩИЙСЯ НАБЛЮДАТЕЛЬ

СВЕТОВОЙ КОНУС

БУДУЩЕЕ, ПРОШЛОЕ, АБСОЛЮТНО УДАЛЕННОЕ, АБСОЛЮТНО БЛИЗКОЕ, ЛУЧ СВЕТА, ВНЕШНЯЯ ЛИНИЯ, ТАХИОН?

E = mc²

ОБЩАЯ (ОТО)

ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Опыт Галилея, Опыт Этвеша, «Лифт Эйнштейна»

КРИВИЗНА ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

L = 2πR, L < 2πR, L > 2πR

УРАВНЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R = -\kappa T_{\alpha\beta}$$

КРАСНОЕ СМЩЕНИЕ

ИНТЕРЕНСИВНОСТЬ, АННАНОВА ВОЛНА, ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ

ЗАМЕДЛЕНИЕ ХОДА ЧАСОВ

ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС

ЛУЧ СВЕТА, КОЛЛАПСИРУЮЩАЯ ЗВЕЗДА

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

ЧЕРНАЯ ДЫРА

ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ, СОБЫТИЕ 1, СОБЫТИЕ 2, СОБЫТИЕ 3, СОБЫТИЕ 4, ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ, РАСШИРЯЕТСЯ ИЛИ СЖИМАЕТСЯ?, ВТОРОЙ БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

10⁻³³ с/м

АНСАМБЛЬ МИРОВ?

НАУКА И ЖИЗНЬ 1 1987, ЖИЗНЬ И НАУКА 1 1987

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Как ни удивительно, но ни специальная, ни общая теория относительности не фигурировали в докладе Нобелевского комитета, содержащем обоснование того, почему Нобелевская премия 1921 года по физике присуждается доктору Эйнштейну. По-видимому, оценка теории относительности еще не стала вполне уверенной, а заслуги и авторитет Эйнштейна были достаточно велики и без его главного творения. Хорошо известно, например, замечание другого выдающегося физика, Макса Борна: «Я думаю, что Эйнштейн был бы одним из величайших физиков-теоретиков всех времен, даже если бы он не написал ни одной строчки о теории относительности». Нобелевскую премию Эйнштейн получил за работу 1905 года по теории фотоэффекта, в которой в физику были введены световые кванты, переносившие энергию от точки к точке.

В том же 1905 году Эйнштейн опубликовал еще две статьи, ставшие впоследствии знаменитыми. Одна из них была посвящена броуновскому движению частичек, взвешенных в покоящейся жидкости, и спустя четверть века оказалась основой для понимания того, что такое «шумы», — фундаментального явления, которое определяет порог чувствительности и, следовательно, эффективность всех измерительных приборов. И, наконец, работа Эйнштейна, поступившая в редакцию ведущего физического журнала того времени «Annalen der Physik» 30 июня 1905 года и озаглавленная «К электродинамике движущихся тел», приобрела совершенно исключительное значение. В этой статье в почти законченном виде была сформулирована специальная теория относительности (СТО). Эйнштейну тогда было 26 лет, и он зарабатывал себе на жизнь в патентном бюро в Берне, анализируя чужие изобретения шесть дней в неделю по 8 часов ежедневно.

В основе СТО лежат два широко известных теперь постулата. Первый постулат Эйнштейн формулирует так: «...для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, справедливы одни и те же электродинамические и оптические законы» (2). Другими словами, неускоренное — инерциальное — движение физической системы как целого не влияет на протекание в ней любых явлений — ни механических, ни электромагнитных, ни оптических. Для механических явлений это уже было известно как неизменность, или, как говорят, «инвариантность» уравнений Ньютона относительно перехода из одной инерциальной системы в другую. Математически такой переход формулируется в виде простых соотношений, называемых «преобразованиями Галилея», а в обыденной жизни мы совершаем его всякий раз, например, вступая в метро на движущийся эскалатор.

Однако электромагнитные явления в отличие от механических оказались неинвариантными относительно преобразований Галилея. Например, какова скорость света в разных системах отсчета? С точки зрения галилеевых преобразований она должна быть разной, то есть зависеть от скорости источника света. Однако нужно было ответить на два каверзных вопроса: «Как распространяется свет?» и «Скорость света — относительно чего?». Ведь, как тогда считалось, для распространения волн нужна какая-то среда: звук, скажем, распространяется в воздухе, волны от землетрясений идут либо напрямик через Землю, либо по ее поверхности, а в какой среде распространяются электромагнитные волны? Чтобы ответить на этот вопрос, физики XIX века постулировали существование особой «светоносной» среды — эфира, который хотя и пронизывает все тела, но не взаимодействует с ними, и поэтому его невозможно обнаружить. Вся его роль сводится к «поддержке» электромагнитных волн: возмущение эфира и представляется нам светом — распространяясь в эфире, «свет побеждает

тму». Поэтому измеренное во многих опытах значение скорости света $c=300\ 000$ км с стали интерпретировать как его скорость относительно неподвижного эфира.

И тогда возникла идея: а нельзя ли измерить скорость Земли в светонесном эфире? Земля обращается вокруг Солнца, поэтому для определения скорости нашей планеты относительно эфира, то есть ее «абсолютной» скорости, можно было бы измерить разность скоростей света вдоль и поперек эфирного «ветра», вызванного движением Земли. Эту красивую идею высказал в 1878 году основатель электромагнитной теории Максвелл, а в 1881 году американский физик Альберт Майкельсон, приняв его вызов, построил в Берлине прибор (I) и поставил опыт, идея которого была очень простой. Испущенный прожектором свет сначала разделялся на два пучка, а затем эти пучки вновь объединялись и направлялись в небольшой телескоп. Из классической оптики хорошо известно, что при этом должна проявляться интерференция света, и наблюдатель увидел бы систему цветных интерференционных полос вроде таких, какие видны на лужах, подернутых масляной пленкой. Но если прибор (он теперь называется интерферометром Майкельсона) повернуть относительно «эфирного ветра», например, на 90° , то полосы должны сдвинуться, потому что запаздывание одной световой волны относительно другой изменяется,— ведь эфирное течение сносило бы эти волны уже по-иному. Именно по сдвигу интерференционных полос Майкельсон и надеялся вычислить скорость Земли относительно эфира.

Но никакого сдвига не было. Это оказалось крайне неожиданным для самого Майкельсона. Шесть лет спустя, в 1887 году, он повторил свой опыт — уже с большей точностью — вместе с другим американским физиком, Эдвардом Морли, и опять — никакого эффекта. Эфирный ветер не проявлялся, а отсюда следовало, что либо Земля вообще неподвижна, либо эфира просто не существует, но в любом случае в представлениях о природе крылась какая-то фундаментальная ошибка.

Этот, пожалуй, самый знаменитый в истории физики парадокс был устранен Эйнштейном, который предположил, что скорость света должна быть одной и той же во всех системах отсчета. Другими словами, кто бы ни измерял скорость света в вакууме, всегда будет получаться один и тот же результат независимо от того, как движутся относительно друг друга источник света и наблюдатель,— свет всегда убегает от нас со скоростью c . Принцип постоянства скорости света Эйнштейн положил в основу СТО как второй главный постулат этой теории.

Самым удивительным следствием двух постулатов Эйнштейна оказалось то, что время в разных системах отсчета, движущихся относительно друг друга, должно протекать по-разному. Интервалы времени, измеренные движущимися часами, должны быть длиннее, чем «такие же» интервалы, измеренные покоящимися часами (7). Если, например, два космонавта пролетают мимо друг друга на большой скорости, то, согласно теории относительности, каждый из них может считать себя покоящимся и быть уверенным в том, что часы встречного космонавта отстали.

А раз время в одной системе отсчета не совпадает с временем в другой — часы двух космонавтов «тикают» по-разному,—то и какие-нибудь события, например, вспышки света, происшедшие в разных местах, окажутся для одного из космонавтов одновременными, а для другого нет. Понятие одновременности в СТО относительно—оно зависит от движения наблюдателя (5).

Этот факт радикально отличает СТО от механики Ньютона, которая основана на преобразованиях Галилея. До появления теории относительности понятия «раньше», «позже», «момент времени», «одновременно» имели универсальный смысл и были правомерны для всей Вселенной. СТО же утверждает, что нельзя рассматривать время в отрыве от пространства, как это делали физики XIX века. Эйнштейн, а также известные математики. Минковский и Пуанкаре объединили пространство и время в одно многообразие— пространство-время. Единая трактовка пространства-времени — главная особенность теории относительности (3).

Последовательность положений природного объекта в пространстве-времени называют «мировой линией». Мировые линии световых лучей, проходящих через точку «здесь и сейчас», разбивают все пространство-время на три области: абсолютно прошлое, абсолютно будущее и абсолютно удаленное. В четырехмерном пространстве времени световые лучи распространяются вдоль образующей конуса, который так и называется — световой конус (II). Смысл названий трех областей внутри и вне конуса становится ясным, если вспомнить, что никакие материальные тела не могут двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме, поэтому их мировые линии остаются внутри конуса. Такие линии называют «временеподобными». Траектории, выходящие за пределы конуса, называют «пространственноподобными», а мировые линии на образующей конуса — «светоподобными». Пространство-время часто называют «пространством Минковского», все его точки — физические события. Каждой паре событий можно поставить в соответствие «расстояние» в пространстве Минковского, которое называют «интервалом». Если выделить математическую суть всей кинематики СТО, то дело сведется лишь к преобразованиям координат и времени, не меняющим величины интервала. Поэтому и говорят: интервал инвариантен, то есть одинаков для всех наблюдателей (4).

Изменение масштаба времени, а также лоренцево сокращение длин (6) и релятивистское увеличение массы — все это механические (а по существу, кинематические) следствия фундаментальных постулатов СТО. Однако, кроме механических, СТО предсказала много неожиданных и красивых электродинамических явления, например, эффект Доплера или относительность электрического и магнитного полей (8). Если в одной системе отсчета имеется электрическое поле и нет магнитного, то в другой системе, которая движется относительно первой, появляются оба поля.

Эффектом Доплера (10) называют зависимость длины световой волны — грубо говоря, цвета, воспринимаемого наблюдателем, от движения этого наблюдателя относительно источника света. Именно благодаря эффекту Доплера было открыто знаменитое «красное смещение» — разбегание галактик в нашей Вселенной. Этот факт означал, что Вселенная расширяется, а объяснить такое расширение сумела лишь общая теория относительности (ОТО).

Несмотря на то, что специальная теория относительности оказала сильнейшее влияние почти на все области физики, очень скоро стали бросаться в глаза ее «недостатки»— пределы применимости. Самое главное— СТО полностью игнорировала гравитацию. Ньютоновский закон тяготения оставался в стороне от революции в физике. Например, довольно долго после создания СТО никто не мог уверенно ответить на вопрос: с какой скоростью распространяется гравитационное влияние тел друг на друга? Правда, в 1906 году Пуанкаре, подчеркнув универсальность принципа относительности, попытался распространить его на гравитацию и найти релятивистские поправки к закону тяготения Ньютона, но об уравнениях гравитационного поля не было еще и речи. Эти уравнения (16) впервые появились в

1915 году в работе Эйнштейна и с тех пор стали называться «уравнениями Эйнштейна». Теория, изучающая эти уравнения и наблюдаемые следствия их решений, получила название общей теории относительности (ОТО).

Уравнения Эйнштейна выражают связь между распределением и движением материи, с одной стороны, и геометрическими свойствами пространства-времени — с другой. В левой части стоит величина, которая характеризует отклонение свойств пространства-времени от «плоского фона» Минковского. В правой части — компоненты «тензора энергии — импульса» T_{ar} , величины, характеризующей плотность материи, то есть вещества и полей. Компоненты метрического тензора g_{ar} описывают одновременно и гравитационное поле, и геометрию (см. «Наука и жизнь», 1987 г., №№ 2, 3), коэффициент χ пропорционален ньютоновской гравитационной постоянной G .

Как можно интерпретировать уравнения Эйнштейна? Коротко говоря, так: частицы и поля искривляют пространство-время и сами же в нем существуют. Поэтому искривленное пространство-время служит символом ОТО точно так же, как плоское пространство Минковского — символом СТО (марочки в самом верху вкладки). ОТО устанавливает для гравитации совершенно особый статус среди всех природных взаимодействий. С точки зрения Эйнштейна, тяготение — это не сила, которая «навязана» пассивному пространственно-временному вместилищу какими-то внешними источниками, как, например, в электромагнитной теории; нет, гравитация — это искажение пространства-времени, его кривизна. Поэтому понятие кривизны играет в ОТО фундаментальную роль. На вкладке показано, как искривление пространства изменяет привычные для всех геометрические, а следовательно, и механические соотношения (15).

Фактически в искривленном пространстве изменяется понятие свободного движения: в ОТО свободной называют частицу, на которую не действуют никакие силы, кроме, возможно, силы тяготения. Таким красивым «встраиванием» гравитации в движение по инерции Эйнштейну удалось избавиться от того непонятного факта, что все тела всегда испытывают силу тяготения и, следовательно, в природе вообще не существует свободных частиц. Нужно было обладать изрядным воображением, чтобы заметить, например, что Луна движется по «прямой» — геодезической, хотя все видят совсем другое.

По если поведение тела в гравитационном поле аналогично движению по инерции, то, значит, в малой области пространства-времени — локально — тяготение можно исключить с помощью ускорения. В такой локально ускоренной комнатке, которую назвали «лифтом Эйнштейна» (14), можно управлять гравитацией по своему желанию. Предположим, что лифт находится в космосе на огромном расстоянии от любых источников сил тяготения, но космонавту, совершающему полет, это неизвестно. Если под полом лифта работают реактивные двигатели, создающие ускорение и не порождающие ни шума, ни вибраций, то у космонавта будет полная иллюзия того, что он покоится в каком-то поле тяготения. И это не просто иллюзия вроде оптического обмана. Опыт показывает, что получить ответ, покоится ли комнатка на поверхности планеты или движется с ускорением по прямолинейной траектории, невозможно никакими средствами. Поведение всех физических объектов в ней в обоих случаях одинаково. Это утверждение называется «эйнштейновским принципом эквивалентности», и он лежит в основе ОТО так же, как принцип относительности в основе СТО.

Принцип эквивалентности — это физическое предположение, и оно должно проверяться экспериментально. По-видимому, первый опыт, показавший, что все тела в гравитационном поле движутся одинаково, независимо от их массы и химического состава, поставил Галилей в самом конце XVI века. Галилея интересовало прежде всего свободное падение тел: с высоты Пизанской башни он бросал грузы из

разных материалов и сравнивал скорости их падения (12). Результаты опытов оказались неожиданными: все тела падали под действием силы тяжести с одинаковым ускорением, что полностью опровергло господствовавшее в то время учение Аристотеля. И опыт Галилея и гораздо более точные эксперименты, поставленные сравнительно недавно, показывают, что ускорение тел в гравитационном поле не зависит от природы вещества. Другими словами, инертная и «тяжелая» массы оказываются равными друг другу — факт совершенно не очевидный, так как в классической механике законы движения Ньютона и закон всемирного тяготения вообще друг с другом не связаны и фактически дают два разных определения массы.

На вкладке показан классический опыт по проверке равенства инертной и тяжелой масс, осуществленный в 1908 году известным венгерским физиком Роландом фон Этвешем (13). Этвеш применил остроумный метод, основанный на использовании крутильных весов — коромысла, подвешенного на тонкой нити, к концам которого прикреплялись грузы из разных веществ. Если отношение инертной массы к гравитационной для двух пробных грузов различно, то нить должна закручиваться. Этвешу удалось установить, что отклонение от равенства двух типов масс не превышало одной стомиллионной (10^{-8}); при этом среди веществ, испытанных им, были даже такие экзотические, как тальк, асбест и змеиное дерево. Рекордная точность в опытах такого типа (10^{-12}) была достигнута советскими физиками из МГУ В. Б. Брагинским и В. И. Пановым — с этой точностью ускорения свободного падения любых тел одинаковы.

В последнее время возник вопрос о применимости принципа эквивалентности в квантовой области. Вопрос был связан с экзотическими объектами, предсказанными ОТО,— черными дырами, которые, как оказалось, из-за квантовых эффектов должны быть окружены равновесным тепловым излучением. Но в соответствии с принципом эквивалентности гравитационное поле черной дыры можно заменить ускоренной системой отсчета, а значит, попросту говоря, любой ускоряемый объект (детектор) должен нагреваться.

На вкладке символически изображено действие черной дыры на подлетающего к ней наблюдателя. Свободное падение на черную дыру равносильно самоубийству: отважный наблюдатель растягивается и разрывается на части огромными приливными силами.

Помимо черных дыр, ОТО предсказала много других, не менее неожиданных следствий (см. статью академика В. Гинзбурга в этом номере). На вкладке показано влияние поля тяготения на свет — гравитационное красное смещение (17), которое следует из принципа эквивалентности и тесно связано с замедлением времени в гравитационном поле (18).

Вскоре после построения ОТО Эйнштейн попытался применить новую теорию ко всей Вселенной. Согласно ОТО пространство-время искривлено, следовательно, динамика Вселенной должна зависеть от ее пространственной геометрии. Астрономические наблюдения (красное смещение) показывают, что мы живем в расширяющейся Вселенной, однако ее дальнейшая эволюция (21) зависит от средней плотности вещества в ней (см. «Наука и жизнь», 1986 г., № 3). А что было раньше, какой была Вселенная в момент своего рождения? Ответ на этот вопрос может дать квантовая гравитация — наука, которая переживает сейчас инкубационный период. Квантовый мир никогда не остается в покое, и квантовая гравитация (22) изучает непрекращающиеся «мерцания» — флуктуации — пространства-времени в предельно малых масштабах (порядка 10^{-33} см). В квантовой теории каждое состояние Вселенной реализуется с определенной вероятностью при измерении какой-нибудь физической величины. Но кто и чем может измерить и выбрать наблюдаемое состояние всей Вселенной, ведь Вселенная — это все, что существует? Чтобы избавиться от этой трудности, несколько американских физиков выдвинули весьма

экстравагантную гипотезу: существует не одна Вселенная, а бесконечная их коллекция, ансамбль миров, отличающихся друг от друга бесконечно мало, скажем, расположением отдельных атомов. Среди этого ансамбля наверняка найдется и конкретный экземпляр Вселенной — той, в которой мы существуем. Если вселенные не взаимодействуют между собой, то для нас они ненаблюдаемы, и, в частности, можно себе представить «невидимый» мир, по своим свойствам совершенно аналогичный нашему, но с одним отличием: вместо журнала «Наука и жизнь» в нем издается «Жизнь и наука» (23).

Имеет ли смысл верить в бесчисленные вселенные, существующие, но недоступные наблюдению? Ведь единственная функция ансамбля миров — гарантировать реализацию нашей Вселенной при квантово-механическом измерении. И почему нам «выпала» именно такая Вселенная, с присущими ей конкретным набором мировых констант, изотропией (независимостью свойств от направления), «трехградусным» реликтовым излучением и другими фенотипическими свойствами? Физического ответа на вопрос, почему мир таков, каким мы его видим, пока нет. Единственная попытка интерпретировать кажущиеся случайными особенности наблюдаемой Вселенной теснее связана с биологией, чем с фундаментальной физикой, и стала называться «антропным принципом» (от греческого «антропос» — человек). Суть этого принципа в том, что свойства нашего мира и, в частности, значения его фундаментальных постоянных не должны быть произвольными, чтобы, например, могли существовать физики, которые эти свойства обсуждают. Иными словами, природа как бы совершила целенаправленный выбор привилегированных физических условий, чтобы создать экологическую нишу для наблюдателя над ее поведением — человека.

С. ПАНКРАТОВ.

Кандидат физико-математических наук.

«Наука и жизнь», № 04 1987 г.