

Вопросы и ответы по специальной теории относительности

Существует масса литературы, посвященной специальной теории относительности (СТО): от популярных книжек до вузовских учебников. И те, кто интересуются, обычно что-то такое прочли.

Но по дискуссиям на интернет-форумах видно, что логика СТО понимается плохо. Отсюда путаница, мнимые «парадоксы», забавные «опровержения». Суть дела пролетает мимо, а в голове застревают ребяческие «мысленные эксперименты», «покоящиеся и движущиеся наблюдатели» и прочая чепуха. Создается иллюзия понятности, но ни одной конкретной задачи решить не получается. Не получается даже понять готовое решение! Зато уверенно критикуют – не саму теорию, а собственное ошибочное представление.

Ниже даны ответы на наиболее частые вопросы, своеобразный FAQ. Предложены разъяснения типичных ошибок и заблуждений, трудных мест – как правило, с новой, не приевшейся стороны. Текст вряд ли можно рассматривать как введение в теорию: изложение ориентировано на читателя, который СТО уже отчасти «знает». Быть может, он убедится в обратном.

Зачем еще одно пособие, когда имеются в достатке популярные книги, в том числе от прославленных авторов? Затем, что оно основано на реальных вопросах людей, как правило, с этими книжками знакомых! Значит, что-то остается непонятым, не уловленным, не осмысленным.

Изложение, построенное в форме вопросов и ответов, предполагает, что воображаемый собеседник владеет элементарной физикой, и способен воспринимать доводы. А в противном случае диалог просто не может состояться...

Просьба к наиболее креативной части публики: не адресовать автору возражения, исходящие из твердого убеждения, что СТО неверна. Моя задача донести до читателя логику теории – по возможности такой, какова она есть. Но не вынудить в нее «верить».

Откуда родилась теория относительности?	2
Откуда берется относительность времени?	3
Кто подлинный автор теории?	4
Что такое пространство и время?	5
Что такое система отсчета?	6
Что означает равноправие систем отсчета?	8
Постулируется ли постоянство скорости света?	9
А что такое скорость света?	10
Нужны ли физике постулаты?	11
В чем проблема синхронизации часов?	12
Как работает относительность одновременности?	14
Почему уверены, что эфир не существует?	16
Так что же искал Майкельсон?	18
Что такое события?	19
Понимаем ли мы преобразования Лоренца?	20
В чем смысл релятивистского интервала?	22
Зачем нам четырехмерное пространство-время?	24
Что такое общая теория относительности?	25
Что такое горизонт событий?	27
Существует ли замедление времени?	28
Какая сила сокращает длину?	30

Как себя ведет свет?	32
Складывает ли скорости сложение скоростей?	33
Существует ли сверхсветовое движение?	34
Так что там с близнецами?	35
Замедляется ли время мюонов?	37
Как объяснить опыт Физо?	38
Аберрация света – эффект абсолютного движения?	39
Эффект Доплера опровергает СТО?	42
Сверхсветовое движение джетов?	43
Обнаруживается ли эфир интерферометром Саньяка?	44
Откуда берется релятивистская динамика?	45
Растет ли масса с увеличением скорости?	47
Превращается ли масса в энергию?	49
Как связана «формула Эйнштейна» с СТО?	50
Какое отношение имеет теория относительности к квантам?	51
Зачем делают ускорители на встречных пучках?	53
Что за «электродинамика движущихся тел»?	53
Магнитное поле – релятивистский эффект?	56
Какова все-таки скорость гравитации?	56
Что читать?	57
Приложение 1. Решаем задачу на СТО	58
Приложение 2. Пространство и время	61
Приложение 3. Ковариантность уравнений электродинамики	64

Откуда родилась теория относительности?

О специальной теории относительности (СТО) я читал немало. И все кажется неубедительным! Два постулата Эйнштейна, неизвестно откуда взятые; сомнительное замедление времени; сокращение длин (которое никто не проверял)...

Вы правы.

В самом деле? Я думал, вы станете переубеждать.

Релятивистское «замедление времени» и «сокращение длины», любимые сюжеты учебников, это математические следствия, выводимые из некоторых соглашений о координатах. Соглашения могут быть иными, координаты – другими. Здесь нет особенно глубокого физического содержания, так как законы природы, разумеется, не могут зависеть от принятой системы координат.

Вы что же, против СТО? Я слышал, что она до сих пор вызывает споры в среде физиков.

Нет, не вызывает. Эта теория является фундаментом современной физики. Не путайте физиков с дилетантами, воображающими себя учеными.

Просто лучше разбираться в теории с другого конца: с реальных проблем прежней, нерелятивистской физики, с наблюдаемых вещей.

Знаю: опыт Майкельсона?

Вы хотели добавить: навязший в зубах. Оставим его в покое, а упомянем следующее:

- 1) поведение частиц, разогнанных до больших скоростей, отклоняется от рассчитанного по законам Ньютона;
- 2) уравнения электродинамики, точно отвечающие опыту в любой конкретной лаборатории, не поддавались пересчету в координаты другой лаборатории;
- 3) отсюда – некоторые электродинамические явления оказывались необъяснимыми;
- 4) не поддавались внятому толкованию опыты с распространением света в движущихся средах;

5) обнаружение факта, что взаимодействия распространяются не мгновенно, сделало саму ньютонову механику противоречивой, парадоксальной.

Любопытно. Из вашего списка мне знаком и понятен только первый пункт...

Это дефект популярных книжек.

Но ведь Эйнштейн просто вывел свою теорию из постулатов?

Такое представление распространено, но ошибочно.

Эйнштейну было хорошо известно, что преобразования Лоренца каким-то образом снимают проблемы уравнений Максвелла. Вообще физикам это было известно: за работами Лоренца и Пуанкаре следил весь мир.

Идея была – подобрать задним числом принципы, совместимые с формулами Лоренца, но имеющие общезначимое содержание. Тем самым показать новое прочтение преобразований Лоренца: не в качестве фокуса, замазывающего прорехи в электродинамике, а как отражение фундаментальных свойств пространства-времени. Которые, следовательно, касаются любых физических законов – к примеру, и механики тоже.

Теория относительности утверждает, что все в мире относительно?

Это анекдотическое представление.

Разумеется, многие физические величины зависят от принятой системы координат. Относительны пространственные координаты точки, пройденный путь. Скорость тела вряд ли можно считать его свойством, скорее, она характеризует выбранную систему отсчета.

Однако *время* в дорелятивистской физике считалось абсолютным. СТО добавила время к списку относительных величин.

Выходит, теория расширила список величин, являющихся относительными?

В каком-то смысле наоборот. Выясняется, что относительные величины являются проекциями на координатные оси некоторых *инвариантов*, не зависящих от системы координат.

То есть, эта теория ближе к абсолютному, к фундаментальным свойствам материи. Которые никак не могут ведь зависеть от случайного, субъективного выбора координат. «Теория абсолютности» – было бы вернее.

Откуда берется относительность времени?

Все же главная особенность СТО это относительность времени. Откуда могла взяться такая идея?

Сейчас поймете. Вспомните про конечную скорость распространения взаимодействий.

Вы сказали, что она приводит к противоречивости обычной механики. Как такое может быть?

Удивлены? Но ведь очевидно: если скорость распространения *дистанционных взаимодействий* конечна, то при переходе в другую лабораторию, движущуюся относительно первоначальной, эта скорость делается другой. И тот же самый механический опыт приведет теперь к отличающимся результатам.

Но по Ньютону такого не может быть, да подобное никогда и не наблюдалось – принцип относительности Галилея верен!

Значит, либо взаимодействия мгновенны (но это опровергается опытом). Либо остается принять, как постулат, что скорость распространения взаимодействий в любой лаборатории одна и та же.

Что приводит к новым парадоксам: как скорость может быть одинакова для любого наблюдателя?

Парадокс мнимый. Противоречит обыденному «здравому смыслу», но отнюдь не логике. Разумеется, из постулата следует относительность времени. Она-то и отвечает на вопрос «как».

«Дистанционные взаимодействия» – это какие: электрические, магнитные, гравитационные?

В том-то и дело, что природа взаимодействия, оказывается, не важна. Механика Ньютона несовместима с *полем*.

Если существует хотя бы одно взаимодействие, распространяющееся не мгновенно, отсюда сразу же следует, что не может существовать мгновенных взаимодействий вообще. Иначе возможно абсолютное время, и проблемы механики сохранились бы. По той же причине не могут существовать поля, возмущения которых распространяются с разными скоростями.

В каком-то смысле поле это единое понятие. Не зря том знаменитого курса теоретической физики Ландау и Лифшица назван «Теория поля». А основа такой теории – специальная теория относительности, с нее и начинается книга.

С механикой Ньютона все в порядке, пока рассматриваются чисто контактные взаимодействия?

Сейчас мы знаем, что любые взаимодействия происходят через поля. Даже если они кажутся простым соприкосновением. Просто при близком контакте тел скорости распространения взаимодействий неощутимы.

А если будет обнаружен эфир?

Об этом можно было думать, пока надеялись, что существует механический эфир. То есть, что любые взаимодействия на расстоянии лежат все-таки в рамках механики, движения массивных тел, вещественных сред.

Давно ясно, что это не так.

А электромагнитного эфира, не являющегося веществом, не может быть принципиально. Предположение о его существовании абсурдно – мы это показали.

Кто подлинный автор теории?

Вы упомянули работы Лоренца и Пуанкаре. Говорят, Эйнштейн позаимствовал их результаты?

Многие формулы, относящиеся сейчас к СТО, мелькали ранее там и сям; но физики затруднялись с их толкованием. Эйнштейн первым понял, что суть дела надо искать не свойствах тел, полей, света, «эфира»... А в свойствах пространства и времени, точнее, *пространства-времени*.

Это разом сняло накопившиеся проблемы и нестыковки в физике, без того, чтобы придумывать для каждой отдельные гипотезы. В этой идее состоит существо СТО. Дальше дело техники: разобраться, какими должны быть свойства пространства-времени, и убедиться, что таковые и в самом деле разрешают все трудности.

Лоренц вывел формулы преобразований из гипотезы эфира. А Эйнштейн взял их для теории, отрицающей эфир. Неувязка?

Ничуть. Лоренц свои формулы подобрал как раз таким образом, чтобы эфир оказался необнаружим (в полном соответствии с опытами!) Лоренц был не первым, хотя судьба присвоила преобразованиям его имя. Ну а Эйнштейн получил свои выводы из некоторых предпосылок. Они совпали с формулами Лоренца, иначе и быть не могло, раз искали согласия теории с опытом.

Тогда почему в статье «К электродинамике движущихся тел» автор не дал ссылок на предшественников?

Говорят, в те времена явные ссылки вообще не практиковались. Считалось, что научное сообщество и без того владеет контекстом.

Можно также догадываться, что Эйнштейн торопился застолбить приоритет. Очевидно, Пуанкаре был близок к тому, чтобы выступить с аналогичной теорией. Спешкой объясняется и структура статьи: в ней как бы «понадкусаны все куски».

Есть мнения, что СТО имеет весьма сомнительные опытные подтверждения. Что, если она будет опровергнута?

Мнения невежественные: СТО как раз и была призвана объяснить эксперименты, которые ставили в тупик. Таким образом, какого-то «возврата к классике» не может быть изначально.

Получается, что теория относительности доказана?

Физическая теория не может быть «доказана». Множество подтверждений не служит ведь доказательством. Другое дело, что теория имеет свои границы применимости.

Разумеется, появляются данные, которые требуют корректировки теории. Кстати, *общая теория относительности* уже является подобной корректировкой.

Теорию относительности критикуют за «мысленные эксперименты», которыми вроде бы подменены настоящие.

Здесь недоразумение. Мысленные эксперименты – просто наглядный способ логических рассуждений на примере разбора задачи. Никакого отношения к собственно экспериментам они не имеют.

Что такое пространство и время?

Теория относительности оперирует пространством и временем. Но, кажется, никто еще не дал их определений?

В физике такие определения подразумеваются: время – это то, что показывают часы, пространство – то, что измеряется линейками.

Какие-то детские определения... Какова глубинная сущность, например, времени?

Напротив, определения предельно конкретны. А вопросы «глубинных сущностей» оставим философам.

Хотя, строго говоря, показания часов – это так называемое *собственное время*.

Собственное – чье?

Этих часов... Или, например, материальной точки, с которой часы связаны.

В таком случае – как время в СТО может быть относительным? Ведь показания часов абсолютно.

Вопрос хороший. Когда говорят об относительности времени, имеют в виду не «время» в изначальном смысле, а координатное представление промежутков времени.

В физике говорят о *координатном времени*, своеобразной временной разметке. О нем узнаем дальше, а для особо любопытных написано Приложение 2. Изюминкой СТО как раз является несовпадение собственного времени с координатным.

А пространство разве не существует вокруг нас объективно, как объем, вместил же всего?

В физике (и в математике также) пространство – формализация, способ познания. То же относится и ко времени.

Хорошо, но часы могут идти по-разному... Опять же: до тех пор, пока в мире не было часов, не было и времени разве?

Разумеется, *часы* понимаются расширительно. Есть процессы разной природы (частота излучения, соответствующая переходу в атоме; обращение планет вокруг Солнца), могущие служить эталонами времени. Если эталонные процессы по возможности освободить от внешних воздействий, случайных влияний – они будут все в большей степени повторяющимися, взаимно согласованными. Служить «хорошими часами».

Значит, физическая задача измерения времени может быть ясно поставлена и (с определенной точностью) решена. Впрочем, согласованное протекание совершенно разнородных процессов подсказывает, что объективно имеется некоторая сущность, которая лежит за ними (и может быть ими измерена).

Вы сказали, что время – это показание часов. Тогда поясните, чьих именно часов: Эйнштейна, или, может быть, моих?

Неважно. Достаточно иметь одни часы, принятые за эталон; другие, удаленные от них в пространстве, могут быть сверены с ними. Конечно, если они абсолютно идентичны первым часам, то есть могут служить эталоном для той точки, где располагаются.

Могут быть сверены и эталоны расстояний.

Что такое система отсчета?

Быть может, странности СТО связаны с тем, что Эйнштейн ввел в физику излишнее, субъективное понятие «систем отсчета»?

Во-первых, Эйнштейн тут ни при чем. И законы Ньютона невозможно корректно сформулировать, не используя понятие *систем отсчета* (СО). В школе вопрос проскакивает незамеченным, отсюда ложное впечатление, что системы отсчета впервые «придумал» Эйнштейн.

Во-вторых, понятие вполне конкретно и объективно. Излагая опять же упрощенно, система отсчета это лаборатория, в которой производятся измерения. Имеется в виду, что все приборы относительно лаборатории неподвижны.

Для начала, СО представляет собой воображаемую совокупность часов и линеек. Иногда считают, что они условно «прикреплены» к выбранному *телу отсчета*. Что вовсе необязательно!

Говоря более точно: система отсчета есть способ назначения событию его *координат* – пространственных и временных.

СТО рассматривает только инерциальные системы отсчета?

Все вообще законы физики формулируют в *инерциальных системах отсчета* (ИСО). Просто потому, что в таких СО законы выглядят проще. Аксиоматика СТО в этом смысле ничем не отличается.

ИСО это системы, движущиеся равномерно и прямолинейно?

Не забывают: движение относительно!

Система отсчета называется инерциальной, если в ней выполняются законы Ньютона.

Вы ведь начали с того, что они не выполняются?

Конечно, имеются в виду скорости, при которых данные законы применимы.

Говорят, что любые две ИСО движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. Если мы знаем одну, то знаем все?

Так утверждает дорелятивистская механика, в которой время абсолютно. Относительно движутся только оси пространственных координат. Но будет ли другая система отсчета инерциальной – зависит еще и от установки ее координатных часов!

«Система координат», если иметь в виду только пространственные оси – еще не система отсчета.

Теория относительности утверждает, что все зависит от выбора системы отсчета?

Любая физическая теория утверждает то же самое.

Но важно помнить про абсолютность наблюдаемого результата – того, что фиксируется приборами. Например, показание часов, находящихся в точке, где произошло событие, абсолютно. Пусть событие привело к остановке часов, положение стрелок зафиксировалось (так в детективах судят о моменте убийства). Разумеется, оно никак не может зависеть от смены системы отсчета.

Другое дело, что разные часы могут в данное мгновение и в данной точке пространства показать разное время. Но и показания двух разных часов в момент их встречи абсолютны.

Точно так же абсолютна отметка о событии на координатной линейке.

Я читал о покоящихся и движущихся системах отсчета. В начале известной статьи Эйнштейна упоминается «неподвижная» система координат. ИСО неравноправны? И почему в кавычках?

Система отсчета неподвижна просто по определению: любые движения задаются относительно нее. Потому при решении задач никогда не подчеркивают «неподвижность» СО.

Но Эйнштейн ищет преобразования координат при переходе между двумя ИСО. Значит, он вынужден указать, какую систему отсчета из двух он рассматривает на данном этапе *как таковую*. На что и он указывает словом «неподвижная». Другая рассматривается до поры просто как система движущихся часов и линеек.

В кавычках – чтобы не возникало иллюзии, что бывает и в самом деле какая-то абсолютная неподвижность.

Обычно назначают какую-нибудь ИСО в качестве опорной, ее время (и координаты) принимают за абсолют.

А если другую ИСО принять за неподвижную, то все изменится?

Нет. Любую задачу можно решить в любой системе отсчета. Что даже используют для контроля правильности решения: должен получиться тот же самый физический результат.

В принципе, можно использовать и неинерциальную систему, но в ней формулы намного сложнее.

Любое тело Вселенной испытывает действие сил, движется с ускорением. Значит, инерциальных систем отсчета не бывает в природе?

Действие сил можно уравновесить другими силами. Но, в принципе – конечно, не бывает: система отсчета есть абстракция для целей анализа, а не что-то реально существующее.

И она не должна быть непременно связана с телом. К примеру, важнейшую задачу механики: *рассеяние частиц* – удобно рассматривать в ИСО центра масс системы. В ней ни одна частица не покоится!

А как быть с реальной лабораторией, в которой ставятся опыты?

Даже для реальной лаборатории неинерциальность не страшна: ее можно учесть поправкой к результатам.

Забавно, когда тезисом «ИСО не бывает!» оперируют в качестве аргумента против СТО. Он ведь должен тогда опрокидывать абсолютно всю физику: любые физические законы формулируют для ИСО, даже если это специально не оговаривается.

Что означает равноправие систем отсчета?

Все же в книгах специальную теорию относительности выводят из двух постулатов. Кажется, первый из них гласит, что любой процесс протекает одинаково в любой инерциальной системе отсчета?

Стакан, стоящий на вагонном столике, неподвижен в ИСО вагона, но движется в ИСО, связанной с поверхностью Земли. Никак нельзя сказать, что он «ведет себя одинаково».

Имелось в виду другое: если будем производить в точности одинаковый опыт в движущемся вагоне или на станции, то получим и одинаковый результат.

Да, так вернее. Формулируя *принцип относительности*, говорят, что для всех инерциальных систем отсчета действуют одни и те же законы (уравнения, описывающие движение). А значит, одинаково будет проходить любой опыт при одинаковых *начальных условиях*, заданных в ИСО.

Именно в этом смысле все ИСО равноправны.

Пишут, что Эйнштейн расширил область действия принципа относительности Галилея, известного в механике, на световые явления – это так?

Не совсем так. То, что скорость звука в разных ИСО получается разной, ничуть не противоречит принципу относительности механики. Просто в законах приходится учитывать наличие среды распространения, ее скорость в данной ИСО, то есть – ветер.

То же самое думали и про свет. Тогда в чем же дело с Эйнштейном?

Эйнштейн принял, что в любой ИСО действуют законы электродинамики (и оптики, конечно) именно в том виде, как они изначально сформулированы. Без каких-либо поправок на «ветер».

В этом, строго говоря, состоит *принцип относительности Эйнштейна*. По-другому его можно сформулировать так: уравнения Максвелла фундаментальны.

То, что электромагнитные явления протекают совершенно одинаково, ставить ли опыты в «неподвижной» лаборатории, или в движущейся (в вагоне, например) – факт, многократно и точно проверенный.

Тогда что мешало установить такой принцип давным-давно?

Просто в обычной механике для перехода между ИСО приняты известные формулы *преобразований Галилея*:

$$x' = x - Vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t.$$

Здесь V это скорость взаимного движения систем координат. Если в физических уравнениях старые координаты выразить через новые, должны получиться...

...те же самые уравнения?

Вот именно! Это называется *ковариантностью* уравнений. Но с уравнениями для поля (уравнениями Максвелла) ничего подобного не получается! Вылезает неувязка, напрашиваются поправки, и как быть?

Лоренцу и Пуанкаре удалось подобрать формулы преобразований, вместо галилеевых, которые не изменяли вид уравнений электродинамики. Они же вошли и в СТО.

Но вроде бы теория относительности применима к огромным скоростям движения. Причем тут вообще электродинамика?

Ошибаетесь, именно проблемы электродинамики и вызвали к жизни теорию. А скорости, при которых сказываются релятивистские законы механики, были для тех лет недостижимыми.

В самом деле: движущийся заряд создает магнитное поле. Оно фиксируется магнитной стрелкой, или рамкой с током, которая поворачивается под действием этого поля.

Но пусть, наоборот, заряд неподвижен, а движется рамка (сменили систему отсчета). Наблюдаемое явление не изменится: рамка, как и прежде, поворачивается. За счет чего?

Видимо, под действием магнитного поля?

Но вокруг покоящегося заряда магнитного поля нет. Это подтвердится, если рамку остановить: она сразу же расхочет поворачиваться.

Электрическое поле тоже отпадает – рамка вроде бы электронейтральна.

Наверно, на то существует какой-нибудь закон электромагнетизма?

Тут в чистом виде релятивистский эффект! Вот они, корни проблем с электродинамикой, упомянутых в самом начале.

Постулируется ли постоянство скорости света?

Второй постулат утверждает, что скорость света в вакууме есть наибольшая скорость в природе?

Такого постулата нет.

Ах, да: постулат говорит о том, что скорость света одинакова в любой системе отсчета?

Уже теплее. Хотя первоначальная формулировка Эйнштейна примерно такова: скорость света в вакууме в любой ИСО не зависит от движения источника.

По-моему, это совсем не одна и та же мысль?

В принципе, та же. Сменим ИСО – скорость источника изменится. Но скорость света от движения источника не зависит, значит, измениться не должна.

Здесь подключается первый постулат: если скорость не зависит от движения источника, значит, является фундаментальной константой, законом природы, ведь в пустоте ей не от чего больше зависеть.

Ну а законы природы одинаковы в любой ИСО – принцип относительности.

Заметьте: если мы приняли уравнения электродинамики фундаментальными, как выше – второй постулат уже в наличии. Так как фиксированная скорость света выводится просто из них.

Итак, скорость света не зависит от скорости источника... и приемника?

Последнее дополнение нелепо: никакого «приемника» может вообще не существовать.

Пусть приемник есть – с ним можно же связать систему отсчета?

Можно связать. Но тогда бессмысленно говорить о скорости приемника: в связанной СО она нулевая.

Нередкая ошибка – подмена скорости света в ИСО приемника *скоростью сближения* света и приемника (что совсем не одно и то же!) Отсюда делают порой абсурдные выводы, «опровергающие» теорию.

Скорость звука тоже не зависит от скорости источника звука. И принцип относительности в механике действует. Что мешает вывести «теорию относительности» для звука?

То, что звук распространяется не в пустоте. В уравнения движения обязательно войдет скорость самой среды в выбранной системе отсчета.

По той же причине скорость света в прозрачной среде никак не может быть инвариантной. Следовательно, она всегда меньше, чем в вакууме. Видите: факт, известный из опыта, вытекает также из общих принципов.

Но то, что свет угодил в постулаты, обусловлено чисто историческими причинами. Сейчас постулат выражают в учебниках так: наибольшая скорость распространения взаимодействий конечна.

Новый вариант формулировки? И опять отличающийся.

Логически – то же самое. Ведь если существует наибольшая скорость, то ее значение это константа, закон природы. Вспомните рассуждения о проблемах с механикой: если скорость взаимодействий не бесконечна, значит – инвариантна.

Но отсюда ведь не следует, что наибольшая скорость равна скорости света?

Повторяю: свет не имеет для теории какого-то особого значения (какое можно вывести из популярных книжек).

Как же – не имеет, если именно свет и обладает таким необычным свойством?

Это свойство не света, а пространства-времени. Любой объект, движущийся со световой скоростью, будет сохранять ее в любой ИСО.

Разве не скорость света фигурирует во всех формулах СТО?

Нет, в формулах фигурирует *фундаментальная физическая константа c* . То, что ее нередко называют «скоростью света» – жаргон, к которому привыкли.

Конечно, скорость света (вообще электромагнитных волн) в пустоте относительно ИСО равна c , но это следует из волнового уравнения электродинамики.

Если хотите, вот вам еще вариант второго постулата: инвариантная скорость конечна. По Галилею, инвариантна, не зависит от системы отсчета только бесконечная скорость. СТО исходит из наличия конечной инвариантной скорости c . Скорости, большие и меньшие c , неинвариантны (и бесконечная тоже!)

А что такое скорость света?

Вернемся к скорости света. Никто еще не измерял ее в одну сторону – «однонаправленную», не так ли?

Это неверно. «Однонаправленную» скорость света, конечно, нельзя измерить без некоторой договоренности о синхронизации часов. Но без таковой не определена вообще никакая скорость.

Первое измерение скорости света в XVII веке Рёмером было произведено как раз «однонаправленным» методом на трассе Юпитер-Земля. Не вдаваясь в детали – Рёмер как бы измерил величину эффекта Доплера. Отсюда, зная скорость движения Земли по орбите (она изменяется в течение года относительно Юпитера), оценил скорость света.

Кстати, простой с виду вопрос: как вы понимаете инвариантность скорости?

А что тут понимать? Скорость света в неподвижной системе отсчета равна c , но если наблюдатель перейдет в другую, движущуюся систему отсчета, то он увидит, что она снова равна c .

Да, фигуру наблюдателя принято вставлять для большей доступности, ведь всегда понятнее, если нарисован человек! Но детская понятность сбивает с толку. Будто бы есть субъективный момент: явления зависят от человека, которому что-то такое «кажется», или он «видит».

Разве это не так?

На самом деле *скорость* – просто пройденный путь, поделенный на время.

Инвариантность скорости означает вот что: если замерять путь и время, пользуясь линейками и часами любой (но одной и той же!) инерциальной лаборатории, то операция деления всюду даст одинаковый результат.

А где находится лично экспериментатор – никакого значения не имеет. Важно, где находятся приборы, именно они должны пониматься под «наблюдателем».

Почему скорость это путь, деленный на время? Нас учили, что она – первая производная по времени от координат.

Да – скорость материальной точки. К свету такое определение неприменимо.

Грубо говоря, в момент t_1 зажгли лампочку, в момент t_2 на расстоянии l датчик зафиксировал вспышку света. Тогда скорость света $c = \frac{l}{t_2 - t_1}$. Кстати, эта скорость (вообще любая фазовая скорость волны) считается в физике скаляром!

Нужны ли физике постулаты?

Честно говоря, мне кажется, что постулаты в физике неуместны. Разве наука вправе декларировать что-то по произволу, вместо того, чтобы добросовестно изучать природу?

Без постулатов (как их ни назови) не может быть науки. Смысл физической теории в *предсказательной силе*, что неизбежно предполагает *индуктивное* установление некоторых общих принципов на основе частных наблюдений.

Предсказание физических явлений это логический (то есть математический) вывод, решение задачи, *дедукция*. Теория – логическая система. Значит, в ее основании должны быть положения, выступающие начальными, исходными. Но произвола здесь нет, не путайте с математикой. Постулаты, по большому счету, берутся из опытов.

Тем не менее, введение Эйнштейном неких постулатов смущает.

Что может смутить? Независимость скорости света от движения источника это общее свойство любого волнового движения, вряд ли кто-то станет спорить. А одинаковость протекания опытов в любой инерциальной лаборатории – просто обобщение итогов массы накопленных экспериментов.

Таким образом, ничего тут Эйнштейн не выдумал. Кстати, в своей основополагающей работе он писал о *принципах*, а не о постулатах.

Почему же сейчас они именуется постулатами?

Два принципа представлялись противоречащими друг другу. Если скорость света не зависит от скорости источника, значит, она зависит от среды распространения – «эффира». Появляется выделенная система отсчета.

Более правдоподобным казалось отбросить именно принцип равноправия систем отсчета. Но, поскольку опыты неизменно подтверждали его справедливость, усилия теоретиков были направлены на придумывание эффектов, как-то маскирующих эфир. Наподобие «сокращения Фитцджеральда».

Слово «постулаты» призвано подчеркнуть незыблемость и достаточность принципов.

Эйнштейн проигнорировал очевидную несовместимость постулатов?

Он понял, что мнимая несовместимость является следствием третьего постулата, принимаемого неявно. А именно – абсолютности времени.

Таким образом, он вовсе не ввел произвольные постулаты. А, напротив, убрал из физики лишние: постулат абсолютности времени и надуманные постулаты, с помощью которых пытались объяснить необнаружимость эфира.

А все же: если введены некоторые постулаты, значит можно ввести другие? Например, принять, что скорость света не инвариантна.

В принципе построены теории, в которых скорость света фиксирована только в одной, абсолютной СО – подбором экзотических, неинерциальных систем отсчета. Но по своим физическим следствиям теории эквивалентны СТО, а выделенная СО необнаружима.

Подобные теории значительно сложнее, в них отсутствует однородность пространства – короче, они представляют чисто умозрительный интерес.

Выходит, что постулаты, в общем, являются некоторой догадкой?

Вы правы. Постулаты в физике нередко результат догадки, интуиции. Такова, например, аксиоматика квантовой механики. Немало теорий выведено из предположения о линейности соответствующих уравнений.

И если все-таки усомниться в постулатах Эйнштейна – значит, СТО на помойку?

Не стоит придавать постулатам теории какого-то фундаментального значения. Как говорилось, они имеют скорее дидактический смысл. Как бы говорят учащемуся: гляди – уравнения «выведены»! На самом деле уравнения физики берутся с потолка, и этого нечего стесняться. Можно постулировать прямо преобразования Лоренца – в качестве преобразований, относительно которых инвариантны все законы физики. Или инвариантность интервала. Что явится постулатом, из которого можно вывести всю теорию. Такая аксиоматика вызовет оторопь, но по существу она не хуже любой другой.

Теория проверяется физическими следствиями, а не убедительностью постулатов. Ускоритель частиц, спроектированный по формулам механики Ньютона, действовать не будет – вот главное.

Заметьте: по существу, вся СТО выводится из очень простого тезиса.

Интересно – какого?

Что существуют одновременные события, которые не могут являться друг для друга причиной и следствием. Например, я щелкнул выключателем – и буду уверять, что через секунду в далекой галактике (из-за этого) зажглась лампочка. Каким-то способом, неважно, каким.

А если я скажу, что такое невозможно?

Согласно кинематике Галилея – возможно! Потому что существует система отсчета, в которой оба эти события произошли в одной точке. Тогда возможность влияния первого на второе не вызывает сомнений.

Получается, что привычная кинематика должна быть поставлена под вопрос. Ну а если не преобразования Галилея, тогда – Лоренца, третьего не дано.

В чем проблема синхронизации часов?

Все-таки изложение СТО в учебниках начинают с принципа синхронизации часов. Добавка к постулатам?

Нет, дидактический ход, уточнение ситуации. Потому что вопрос синхронизации часов в прежней кинематике оставался традиционно за кадром.

Физика нуждается в задании координат – пространственных и временных. Так, рассмотрение механического движения использует понятие скорости. Для введения ско-

рости требуется, по меньшей мере, пара разнесенных в пространстве часов, фиксирующих моменты старта и финиша.

Однако при их помощи можно получить вообще любое значение скорости – отсутствует однозначность! Потому что непонятно, как соотносятся между собой часы.

Что тут непонятного? Различные часы должны идти одинаково, быть синхронными.

Другими словами, должны иметь одновременно одинаковые показания. Но возникает вопрос, что такое *одновременность*. Или, переводя в конструктивное русло: каким способом синхронизировать часы, устанавливать координатное время?

Кажется, что понятие одновременности очевидно, разве не так?

Просто обычно нам представляются события, происходящие рядом. Но синхронизация разнесенных, разноместных часов вовсе не ясна сама собой. Если одно событие произошло рядом с нами, другое – в далекой галактике, вопрос их одновременности уже не покажется элементарным.

Отчего же? Отправим сигнал от одних часов к другим. И учтем поправку на время движения, исходя из скорости сигнала. Годится?

Порочный круг. Для расчета поправки надо знать скорость синхросигнала, но, чтобы говорить о скорости, требуется заранее иметь координатное время! При определении синхронности, одновременности – использовать понятие скорости нельзя.

Почему же в обычной механике не говорят о подобных проблемах?

Как раз из-за того, что понятие одновременности казалось очевидным. Механика Ньютона подразумевает мгновенные взаимодействия. Принципиально – с их помощью можно корректно синхронизировать все мировые часы.

Что значит – корректно?

С учетом общезначимого *принципа причинности*: причина всегда опережает по времени следствие. Посему, если имеем два события, происшедшие в двух разных точках (разноместные), и одно из них является (или может являться) следствием другого, одновременными считать их нельзя.

Если хотите, тут естественное условие, что если A одновременно с B , то и B одновременно с A .

Разумеется, а как же иначе?

Вот видите! На языке математики, одновременность является *отношением эквивалентности*, которое должно удовлетворять требованию *рефлексивности*. Оно выполняется, если за одновременные принимаются события, между которыми причинно-следственная связь невозможна в обе стороны.

Но в ньютоновой механике таких событий не существует! В ней одновременными являются два события, каждое из которых может быть и причиной, и следствием другого (тоже рефлексивность). Те самые, связанные якобы мгновенным взаимодействием.

Причина – она же и следствие... Не кажется ли такое бредом?

Именно что кажется. Физически механика Ньютона неправдоподобна.

Но у нас СТО, в ней не существует мгновенных взаимодействий. Значит, нельзя определить одновременность?

Вполне можно! Часы синхронны тогда, когда выполняются законы механики Ньютона – вот вам и определение. Собственно говоря, приняв, что используются инерциальные системы отсчета (это и значит, что законы Ньютона для малых скоростей выполняются!), мы косвенно определили координатное время. Добавлять сюда уже нечего.

Определение системы отсчета непременно включает и синхронизацию координатных часов, что в прежней физике выпадало из внимания. А ведь СТО решительно ничего нового в понятие системы отсчета не вносит!

А как же способ синхронизации световыми сигналами, который предложил Эйнштейн?

Он вовсе необязателен. Синхронизация часов основана по сути дела на принципах однородности и изотропности пространства в ИСО.

Вот вам пример. Из середины отрезка, соединяющего часы A и B , разлетаются в обе стороны два одинаковых шарика, растолкнутые пружиной. Моменты достижения ими часов принимаем одновременными. Иначе не соблюдался бы закон сохранения импульса.

Но ведь у Эйнштейна (и вообще в учебниках) не так?

Да, традиционно говорили о замере времени прохождения светом фиксированного отрезка между часами – сначала в одну сторону, потом обратно. Время в пути определяется, естественно, вычитанием показаний двух часов. Равное время туда и обратно свидетельствует, что часы синхронны, ну а если нет, их можно подвести. Здесь не требуется искать середину дистанции.

Способ точной синхронизации путем обмена световыми сигналами видится также единственно реальным для практического использования.

Но при таком способе – скорость света получится, уж разумеется, постоянной! Хитрость Эйнштейна?

Подобный вывод был бы действительно нелепостью. Наоборот: из инвариантности скорости света для ИСО следует допустимость такого способа.

Вы говорили про события в механике Ньютона. А что с ними в СТО?

В СТО вполне возможны разноместные события, не могущие быть связанными причинно-следственной связью, и потому претендующие на роль одновременных. А именно – такие, что сигнал от события A не успеет дойти к точке события B , и наоборот.

Говорят, что A и B квазиодновременны. Моментов B , квазиодновременных с A , множество: целый отрезок – по часам в точке B . Истинно одновременным A считают момент B , соответствующий середине этого временного отрезка, что эквивалентно способу Эйнштейна.

«Считают», значит, есть элемент условности, соглашения?

Да. В СТО можно ввести синхронизацию часов, которая будет давать неинерциальную систему отсчета. В ньютоновой механике такое невозможно, корректное координатное время одно-единственное.

А как насчет того, чтобы сверить все часы в одном месте, а потом помещать их в любые точки?

Метод развозки часов опирается на неявный постулат: движение часов ни на что не влияет. В действительности, разные часы, перемещаемые из точки в точку различными способами, разойдутся в показаниях – проверено опытом.

Между прочим, можно доказать: чем меньше скорость перемещения часов, тем меньше расхождение.

Как работает относительность одновременности?

Я уже понял, что относительность времени и одновременности – следствие совмещения двух постулатов. Но не является ли она противоестественной, что ли?

Нас же не удивляет, что в разных системах отсчета скорость конкретного тела не одинакова. Или что не абсолютен пройденный им путь. Просто это более привычно, чем время: в повседневной жизни относительность времени не проявляется.

Разные часы движущейся ИСО разнесены в пространстве, сигнал идет от них к наблюдателю тем большее время, чем дальше они удалены. Может быть, в задержке и надо искать причину кажущейся неодинаковости хода этих часов?

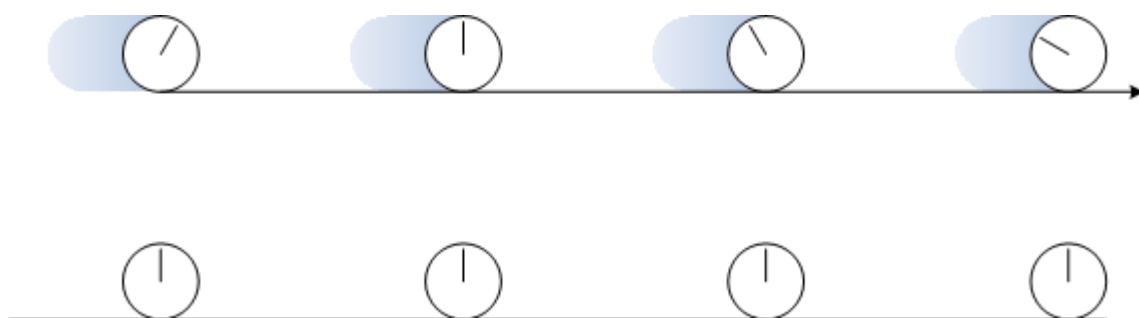
Это ошибочное представление. Всегда имеется в виду сравнение показаний часов, находящихся строго рядом. А куда, какому «наблюдателю», и каким способом будет доставлено сообщение о результате, на содержание сообщения уж конечно не повлияет.

Хорошо, а есть какие-то формулы относительности одновременности?

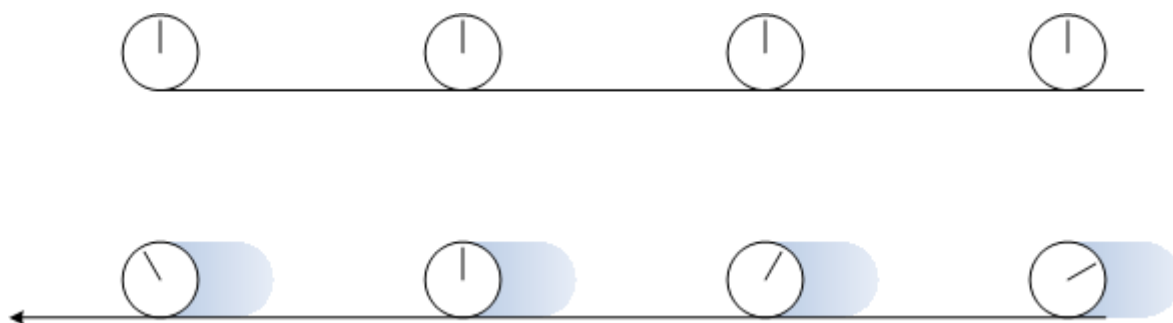
Есть: формулы преобразований Лоренца. Данный сюжет обособлен из-за его важности. А также потому, что об относительности одновременности частенько забывают сочинители «парадоксов СТО».

На качественном уровне надо представлять себе, что, если мимо движется система с множеством часов, то ее часы будут опаздывать тем больше, чем дальше они расположены вперед по направлению движения – как на рисунках.

Эффект взаимный: из второй ИСО – первая движется в противоположную сторону с отставанием часов по мере удаления в направлении уже ее движения.



Верхняя вереница часов движется вправо. Чем правее находятся часы, тем меньше их показания



Перешли в СО верхних часов. Нижняя вереница движется влево. Чем левее находятся часы, тем меньше их показания

Кстати, о парадоксах: кажется, есть такой – парадокс шеста и сарая?

Его называют также «карандаша и пенала», смотрите рисунки. Летящий шест (в покое имеющий длину, большую, чем у сарая), за счет релятивистского сокращения длины в какой-то момент полностью уместается в сарае.



Покоящийся шест длиннее сарая



Движущийся шест укорочен в направлении движения, и одновременно уместился в сарае

Да. Теперь его можно резко затормозить... И он будет покоиться внутри сарая, хотя и длиннее его?

Безусловно.

Поскольку деформирован, сплюснен в направлении движения.

С чего бы? Мы ведь не сталкиваем шест со стенкой! Тормозим корректно: одновременно каждую точку шеста.

Это и подразумевалось. Но с точки зрения наблюдателя на шесте – торможение не будет одновременным! В ИСО шеста сначала сработает тормоз в передней части, а задняя продолжает двигаться. Скорость распространения деформаций конечна, «хвост» шеста не в состоянии почувствовать, что на «носу» сработал тормоз.

Далее события торможения будут распространяться к хвосту, а шест – собираться в «гармошку».

А если тормозить одновременно все точки уже в системе отсчета шеста?

Теперь шест останется целехоньким.

Однако в ИСО сарая окажется, что первым затормозил «хвост», а «нос» продолжает движение! Когда волна торможения дойдет до передней части, шест восстановит свою нормальную длину. И, безусловно, высунется за выходную дверь сарая.

Вот так и работает относительность одновременности!

Почему уверены, что эфир не существует?

Теория относительности отвергает эфир. Однако наука рассматривает физический вакуум, обладающий определенными свойствами... Почему же он не эфир?

Когда говорят, что СТО отбросила гипотезу эфира, это имеет известный смысл: подразумевается гипотетическая среда распространения взаимодействий. Рассмотрение же «пустого» пространства как материи, обладающей некоторыми свойствами, например, квантовыми – просто выходит за рамки предмета СТО.

Если «пустое» пространство не пусто, тогда в каком смысле СТО отрицает существование эфира?

Разумеется, не в смысле «пустоты» или «непустоты» (как иногда воображают). Идея эфира в физике тесно связана с *волновым уравнением*, которым описывается любое волновое движение: например, акустические волны, и электромагнитные также.

Волновое уравнение (впоследствии мы с ним познакомимся) нековариантно: если произвести в нем замену переменных: $x = x' - Vt$, $y = y'$, $z = z'$, $t = t'$ – оно рассыплется. В своей классической форме оно действительно лишь в одной лаборатории, где отсутствует «ветер». А в других, движущихся относительно первой, оно выглядит иначе.

Следовательно, проводя опыты по распространению света, можно отыскать эту «абсолютную» систему отсчета. Или же вычислить скорость нашей лаборатории относительно абсолютной СО (относительно «эфира»).

Значит, эфир следует просто из математики?

Наконец-то вы поняли! Опытов проделали громадное количество. Установлено, что электромагнитные волны распространяются в любой лаборатории в точности так, как будто именно она покоится в среде.

Но такое невозможно математически! Над этой проблемой и ломали голову первоклассные физики. Очень близко к ее разрешению подошли Лоренц и Пуанкаре: оказалось, что существуют единственные преобразования координат, сохраняющие вид волнового уравнения во всех инерциальных системах отсчета (преобразования Лоренца).

В специальной теории относительности, базирующейся на этих преобразованиях, проблема «эфира» снята.

Эфир отвергнут?

Не «эфир отвергнут», а снята проблема нековариантности волнового уравнения.

Таким образом, не существует абсолютного движения, а любые инерциальные системы отсчета равноправны. Иными словами, невозможно обнаружить «эфирный ветер».

И все же – если «пустота» не пуста, почему ее наполнение не считают эфиром?

Именно по той причине, что указана строкой выше. Физический вакуум *лоренц-инвариантен*: ни в какие уравнения не входит в качестве параметра скорость системы отсчета относительно «эфира» (точнее, скорость эфира в данной ИСО). Попытка формально ввести подобный параметр в уравнения Максвелла не удалась.

Разве классическая механика с абсолютным пространством не привычнее?

Тут нередкое недоразумение. В механике Ньютона то же самое: все ИСО равноправны, а значит, никакого абсолютного пространства нет. Независимо от того, что об этом думал лично Ньютон.

Смысл эфира все-таки в роли среды для распространения электромагнитных волн. Иначе встает вопрос: что же колеблется?

Перед нами волна на море. Что в ней колеблется? Уровень воды. Он уходит в «плюс» и «минус» относительно значения, принятого за ноль.

В электромагнитной волне аналогично колеблется уровень поля – относительно нуля. Что тут смущает?

Пока волн нет, все-таки остается сама вода. А если нет электромагнитной волны – мы имеем пустоту, поле равно нулю. Колебаться предстоит пустоте?

Считать, что ноль означает «ничего нет» – неверный, детский взгляд. Все равно, как заявить: если температура на улице нулевая, то температуры вообще нет.

Конечно, поле невозможно пощупать, как воду. Но обиходную неощутимость нельзя считать за отсутствие чего бы то ни было.

Поле равно нулю – значит, его не только ощутить, но и приборами обнаружить нельзя?

Тем не менее, поле всегда есть. В отличие от вещества, поле это состояние всего пространства. Просто некоторая характеристика поля в данный момент и в данной точке может быть равна нулю. Да и то – только в конкретной системе отсчета.

«Ноль» совсем не означает, что поля нет. Напряженность ноль, зато потенциал не ноль. Считайте, что поле это потенциал, а потенциал имеет смысл с точностью до константы. Вот вам и бездонное «море», по которому бегут электромагнитные волны.

Но как же Эйнштейн писал про «скорость света в пустоте»?

Подразумевалось следующее: «не в веществе». И не более.

А чем плохо понимание эфира как фундаментальной субстанции, из которой строится все сущее?

Подобные концепции – достояние ушедших времен, с их неизбежными теплородами и электрическими флюидами. Сейчас физике известно, что даже очевидные «субстанции» являются не тем, чем кажутся, а вопросы типа «из чего состоит то или это» – не имеют смысла. На место частиц встали волновые функции, квантованные поля, виды симметрий. Возврата к примитивному «мировому киселю», из которого сделана материя, точно не предвидится!

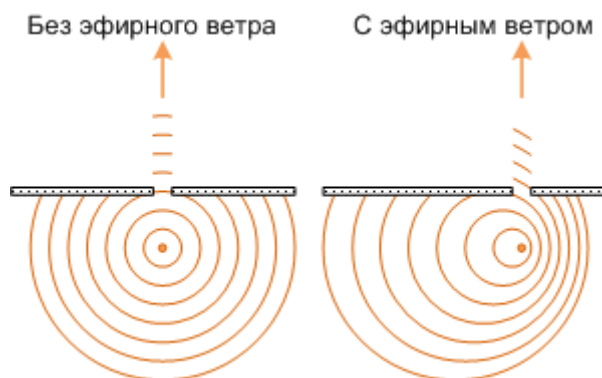
Так что же искал Майкельсон?

Вроде бы, экспериментально отсутствие «эфирного ветра» было доказано опытом Майкельсона?

Ошибаетесь. В течение всего XIX века ставились эксперименты, призванные обнаружить «снос» движущимся эфиром света и электромагнитного поля – правда, в первом порядке величины $\frac{v}{c}$. Они ничего не обнаружили, что естественно: в установке с неподвижным источником и приемником – предполагаемый эфирный ветер (в вакууме) мог бы дать лишь эффект второго порядка величины $\frac{v^2}{c^2}$. А он лежал вне точности приборов XIX века.

Но луч должен же сноситься поперечным эфирным ветром! От орбитальной скорости Земли отклонение на дистанции 10 метров составит 1 мм. Через 12 часов такое же отклонение появится в другую сторону, разве трудно его обнаружить?

Нет, не так. Отклонение означало бы, что форма луча искривляется, свет идет не по прямой. Но скорость «частицы» света в каждой точке – векторная сумма скорости в неподвижной среде плюс скорость «ветра», то и другое константы. Причин для непрямолинейного распространения нет. Вот для наглядности картинка.



Однако в опытах с прозрачными средами, с показателем преломления, большим 1, эффект первого порядка ожидался вполне обоснованно. Провели множество изощренных экспериментов – с неизменно нулевым результатом. Теория Френеля (о ней еще придется говорить) наскоро залатала дыру.

Установка Майкельсона могла ловить эффект второго порядка?

Да... но передовые теоретики того времени скорее удивились бы, если бы опыт Майкельсона что-то обнаружил. Все было уже ясно.

Что именно ясно?

Что распространение волн, и вообще электромагнитных взаимодействий – процесс не механический, не связанный с движением масс. Следовательно, как уже объяснили,

должно быть либо мгновенным (что противоречит опытам), либо иметь инвариантную скорость.

В чем идея опыта Майкельсона?

Майкельсон пытался обнаружить движение относительно предполагаемой механической среды распространения света.

Движение в эфире обнаружимо во втором порядке величины $\frac{v}{c}$. Можно замерять время, затрачиваемое сигналом на распространение вдоль фиксированного отрезка туда и обратно (с отражением на конце). Та система отсчета, в которой время будет наименьшим, покоится относительно среды.

Или проще: замерять это время при разных ориентациях прибора. Одинаковые результаты будут означать, что система покоится абсолютно. А если неодинаковы, можно вычислить скорость движения относительно среды. Такова идея опыта Майкельсона и Морли. Но он дал (применительно к свету) отрицательный результат.

Почему не предположить, что эфир увлекается Землей? Тогда результат Майкельсона понятен.

Конечно, думали и об этом (теория Стокса). Но такие «течения» в массе эфира влекут следствия, которые легко обнаружили бы астрономическими наблюдениями. Разве только считать, что Земля увлекает с собой эфир всей Вселенной...

Отрицательный результат окончательно похоронил все теории эфира, кроме концепции Фитцджеральда-Лоренца. В соответствии с ней эфир, хотя и существовал номинально, был необнаружим. Оставался последний шаг: отбросить идею эфира, как излишнюю.

И все-таки может случиться, что эфир будет со временем обнаружен?

В его классическом значении – нет, исключается.

До СТО еще можно было сохранять понимание поля как способа математического представления. Поле скоростей, поле температур, – здесь естественными были вопросы: скорость – чего? температура – чего?

Когда стало очевидным, что электромагнитное поле является самостоятельной материей, а не просто математическим формализмом – с этого момента идея эфира потеряла физическое содержание.

Утверждают, что Майкельсон и Морли все-таки обнаружили эфирный ветер, хотя и меньшей величины, чем ожидалось. Называют также Миллера. Почему не пересмотреть протоколы их опытов?

Здесь недоразумение. Подобные эксперименты многократно повторялись с точностью, на много порядков большей, чем те, давние. Ссылка на Майкельсона – просто дань уважения. Его результаты суть факт истории, а не современной науки.

Что такое события?

Почему в контексте СТО говорят о событиях? А не физических телах, например...

Для того чтобы работать с координатами.

Допустим, в геометрическом пространстве (трехмерном) задана система координат, тогда можно говорить о координатах некой точки. Систем координат может быть сколько угодно, координаты точки в другой системе будут иными, можно говорить о преобразовании координат...

Все так.

Нет, не так с физической точки зрения. Откуда известно, что эта точка та же самая? При переходе в другую систему конкретная точка должна быть как-то идентифицирована, помечена.

Я догадываюсь: вероятно, можно поместить в нее материальную точку?

Хорошая мысль... но вторая система координат движется относительно первой, математическая точка преобразуется в линию. Без рассмотрения времени не обойтись!

Событие определяет точку в четырехмерных координатах: к трем измерениям пространства добавляем время.

Получили пространство Минковского?

О нем говорить преждевременно, пока не интересуемся метрическими свойствами. Попросту говорим об отсчете времени, добавляемом к трем пространственным отсчетам, то есть о *пространстве событий*.

Событие математически точно, в какую бы систему координат ни перешли, по-сему принято за базовое понятие. Если выбрана система отсчета, событие характеризуется четырьмя числами: x, y, z, t .

Событие – физический абсолют, *инвариант*. Если оно случилось, никак не может найтись наблюдателя (системы отсчета), для которого оно не произошло и никогда не произойдет.

В Приложении 2 дана интерпретация понятий пространства и времени с опорой на пространство событий. Изложение может показаться несколько заумным... Но если вникнуть – оно несложно. И дает более точное представление о том, что понимают в физике под пространством и временем.

Понимаем ли мы преобразования Лоренца?

Как я понимаю, суть СТО заключена в преобразованиях Лоренца?

Такое впечатление можно вынести из учебников, где преобразования рассматриваются в самом начале.

Но надо понимать: преобразования координат – просто математические зависимости, формулы, связь новых координат с первоначальными. И формулы не запрещается предложить любые!

Физическое же содержание СТО состоит в двух пунктах:

1) именно преобразования Лоренца (а не какие-то иные) переводят инерциальную систему отсчета в инерциальную же;

2) в ИСО для материальной точки справедливо: $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ при $v = 0$.

Как было сказано, законы электродинамики при переходе из ИСО в ИСО не меняются.

Разве инерциальность СО связана не с соблюдением законов Ньютона?

Именно об этом и говорит второй пункт. В области малых скоростей законы Ньютона так же действительны при пересчете по Лоренцу, как и по Галилею. А вот в общем случае их пришлось признать неверными, ориентируясь на более точно проверенные законы электродинамики.

Когда появились средства точнее проверить механику, подтвердилась правильность ее релятивистской версии.

Формулы преобразований Лоренца вроде бы хорошо известны?

Тем не менее, стоит их напомнить:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - Vx/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

Для краткости применяют обозначение: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$ – *фактор Лоренца*, больший единицы.

Это формулы для преобразования длин и времени движущихся (со скоростью V) тел?

Неправильно. Во-первых, преобразования не имеют прямого отношения к движению каких-либо тел или материальных точек. Они касаются событий.

Во-вторых, t , x и прочее – не время и длина. А пространственные и временные *координаты*. Преобразования (Лоренца, или какие-то другие) имеют отношение к пересчету координат событий.

Движущихся друг относительно друга?

События не могут быть движущимися или покоящимися. Преобразования координат имеют отношение к смене систем отсчета.

Они отвечают на простой вопрос: если известны координаты события в некоторой системе отсчета – каковы его координаты, измеренные средствами другой ИСО? Разумеется, другая ИСО движется относительно первой, иначе задача тривиальна. В формулах V – взаимная скорость движения систем отсчета (а не тел!).

Из теории относительности следует, что координаты в другой ИСО будут другими?

Они будут другими и в нерелятивистской механике. Там тоже существует относительность, количественно выражаемая *преобразованиями Галилея* – помните?

Преобразования координат говорят нам вот что: напротив часов, показывающих время t , и находящихся в точке с координатой x одной ИСО – находятся часы другой ИСО, показывающие t' , и метка x' ее линейки. И более ничего.

Чему равны t' и x' – смотри формулы.

Все же непонятно, что именно движется со скоростью V , если система отсчета – просто способ назначения событию координат?

Вопрос справедливый. Поначалу можно считать, что V является просто параметром преобразования. Но потом оказывается, что тело, покоящееся в одной ИСО, в другой движется со скоростью V . Такой подход корректнее, чем когда воображают себе какие-то движущиеся линейки.

В формуле для времени смущает второй член в числителе. Даже при малом v – найдется большая координата x , при которой времена разных систем отсчета значительно разойдутся. Разве эффекты СТО не должны проявляться лишь при релятивистской скорости?

Речь идет о различии координатного представления в разных системах отсчета. Координаты это условность, они не представляют собой какого-то физического результата – «эффекта СТО».

А слагаемое отражает относительность одновременности. Понятно, что на значительных дистанциях оно обязательно скажется.

Преобразования Галилея отвечают здравому смыслу; почему их надо отбросить? Быть может, есть другие пути для теоретических построений?

Тут не здравый смысл, а житейская привычка.

Преобразования Галилея соответствуют бесконечной скорости распространения взаимодействий. Если уж апеллировать к «здравому смыслу», подобное предположение странно!

Нельзя ли сохранить преобразования Галилея при условии конечности предельной скорости взаимодействий?

Нельзя, данные принципы несовместимы. Не работает галилеево правило сложения скоростей.

Вообще преобразования пространственно-временных координат должны обладать *групповыми свойствами...*

Что это значит?

Говоря упрощенно, цепочка преобразований из A в B , а потом из B в C – должна дать тот же результат, что и прямо из A в C .

С этим я, разумеется, согласен.

Математика говорит, что группу могут образовывать лишь преобразования Лоренца (ну и Галилея, являющиеся предельным случаем для $c \rightarrow \infty$). Кстати, по этой причине любые альтернативные «преобразования Пупкина» можно заведомо не рассматривать.

Следует обратить внимание: формулы Лоренца в общеизвестной форме справедливы строго при условии, что начала отсчета обеих систем, старой и новой – совмещены.

Что это означает?

Начало отсчета это опорное событие, принятое за ноль координат. Предполагается, что данное событие имеет координаты $t = 0$, $x = y = z = 0$ – и в одной, и в другой ИСО. А иначе стандартные формулы преобразований неверны, надо переходить к более сложным!

В чем смысл релятивистского интервала?

Из преобразований Лоренца следует инвариантность интервала?

И наоборот, постулируя инвариантность интервала, получим преобразования Лоренца.

Во многих задачах фигурирует пара событий, и рассматривают пространственные и временные соотношения между ними. Ясно, что пространственные (Δr) и временные (Δt) промежутки различаются в разных системах отсчета.

«Ясно», если исходить из СТО?

Почему же? И в обычной кинематике расстояние между событиями меняется в зависимости от системы отсчета. Два «тика» часов, лежащих на вагонном столике, случились в одной пространственной точке в ИСО вагона... но не в ИСО перрона! Правда, промежуток времени считается неизменным.

В СТО пара событий обладает неким инвариантом. Величина, называемая *релятивистским интервалом*, неизменна в любой ИСО. Квадрат этой величины выражается так:

$$s^2 = (c\Delta t)^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = (c\Delta t)^2 - \Delta r^2.$$

Интервал имеет размерность длины.

В чем глубокий смысл «интервала»?

С математической точки зрения интервал выражает *метрику* пространства-времени, «точками» которого являются события. Метрика – своеобразное расстояние между точками, которое не должно зависеть от выбора осей координат. В *пространстве Минковского* x, y, z, t переход к другой ИСО есть четырехмерный поворот осей координат, метрика остается неизменной. Математики называют такое пространство *псевдо-*

евклидовым: в нем выполняется теорема Пифагора, но своеобразно: в формуле для квадрата гипотенузы s^2 , вместо всех плюсов, присутствуют, как видим, три минуса.

Интервал полезен и практически.

Чем именно?

Упрощает решение задач, позволяет проводить быстрый анализ.

Очевидно, что в той ИСО, в которой пространственный промежуток между событиями меньше, меньшим будет и промежуток времени. И можно точно сказать – насколько меньше.

Разность $c^2\Delta t^2 - \Delta r^2$ должна сохраниться постоянной?

Верно. И мы легко приходим к некоторым общим выводам.

Если $c^2\Delta t^2 - \Delta r^2 > 0$ (интервал действителен), то выберем систему отсчета, в которой $\Delta r = 0$: оба события происходят в одной точке пространства. Здесь и промежуток времени минимален.

Интервалы, выражаемые действительным числом, принято называть *времениподобными*. События могут быть причинно связаны (более позднее – следствие раннего).

А откуда вдруг взялись причины и следствия?

Оттуда, что если первое событие вызвало световой сигнал, он доберется до точки второго раньше, чем оно произойдет.

Любые два мгновения из «жизни» движущейся частицы разделены времениподобным интервалом. Вам понятно – почему?

Кажется, да. В той СО, где частица неподвижна, события с ней происходят в одной и той же точке пространства?

Верно; такую СО называют *сопутствующей*. Можно рассудить иначе: движение частицы представляет собой цепочку причин и следствий.

Если события таковы, что $c^2\Delta t^2 - \Delta r^2 < 0$, интервал называется *пространственноподобным* (он мнимый). Такие события мы, помните, называли квазиодновременными: можно подобрать СО, в которой они происходят одновременно: $\Delta t = 0$ (но, конечно, в разных точках пространства). Эти события никак не могут быть связаны причинно-следственной связью, ведь найдутся системы отсчета, в которых раньше произошло одно событие, либо другое.

В галилеевой кинематике все интервалы времениподобны. Поскольку там не существует предельной скорости, то можно представить себе систему отсчета, которая за секунду улетела на миллиард километров. Для нее два события, разделенные одной секундой и 1000000000 километрами, произошли в одной точке пространства.

Что за чушь?

А некоторые считают, напротив, что СТО это чушь.

Вы говорите, что можно выбрать систему отсчета, в которой $\Delta r = 0$. Это и есть релятивистское сокращение длины?

Вовсе нет: здесь мы говорим о расстоянии между точками событий, а не о длине физического тела.

Все-таки интервал кажется искусственным понятием. Ведь его нельзя измерить каким-то прибором?

Можно: прибор – движущиеся часы. Собственное время, которое они показывают, и есть интервал между событиями из жизни этих часов (с коэффициентом c , конечно).

А линейка прямо измеряет пространственноподобный интервал между событиями, если только они одновременны в ИСО линейки.

А что если интервал равен нулю?

Такой интервал называют *светоподобным*. Он характерен для событий, разделенных распространением света (вообще безмассового объекта, движущегося со скоростью света).

Почему время является мнимой величиной?

Нет, не является. Догадываюсь: нечто подобное вы видели в книгах.

Удобно считать, что преобразования Лоренца соответствуют повороту осей в 4-мерном пространстве. Тогда пространство должно формально иметь структуру евклидоваго.

Этого можно добиться, введя координату, равную ict , где i – мнимая единица. В формуле интервала все квадраты получатся с одним знаком (его можно назначить плюсом). Теперь переход к движущейся ИСО трактуется как геометрический поворот осей координат – в 4-мерной геометрии, конечно. Правда, угол поворота мнимый...

В итоге все это эквивалентно знакомым преобразованиям Лоренца. Принимать ли такую модель – дело вкуса. Во всяком случае, само время t остается, безусловно, вещественным.

Зачем нам четырехмерное пространство-время?

Быть может, «пространство Минковского» надумано, искусственно, просто математический фокус?

Разумеется, это формальное построение. Можно обойтись без него. Однако математически оно адекватно законам нашего мира.

В самом деле, привычные трехмерные векторы (такие, как скорость) изменяют длину (модуль) при переходе в координатную систему, движущуюся относительно первоначальной. Что математически ущербно: длина вектора не должна зависеть от принятой системы координат.

Она и не зависит – если поворачивать оси. А взаимно движущиеся координаты разве в счет?

Физически они, как мы знаем, равноправны. За этим должно стоять и математическое равноправие: поступательное движение осей координат тоже как некий «поворот».

Непостоянство длины трехмерных векторов говорит о том, что они на самом деле не векторы. А три пространственные координаты не исчерпывают всех измерений. То же наблюдаем в лице мнимых скаляров, например, энергии. Которая не сохраняет свою величину при переходе к другой системе отсчета, и, следовательно, скаляром не является.

Скорость не вектор – просто удивительно. И как же быть?

Подсказку даст величина, сохраняющаяся в любой системе отсчета, то есть являющаяся настоящим скаляром.

Догадываюсь: интервал?

Верно. В качестве скаляра, он представляет длину некоторого вектора – «настоящего». Им является четырехмерный *радиус-вектор события*, получаемый дополнением пространственного радиус-вектора r временной координатой ct . Его длина и есть известный нам инвариантный интервал, «расстояние» между событиями.

Говорят, что четырехмерный радиус-вектор *лоренц-инвариантен*.

Интервал – он между двумя событиями. Где же второе?

Одно из событий – начало координат.

Не понял... Какой именно системы координат? Разные системы взаимно движутся!

Движутся трехмерные пространственные координаты. А 4-координатные системы имеют общее начало (момент времени $t = 0$). Начало координат это некоторое опорное событие – помните?

В СТО привычные по школьной механике векторы превращаются в *четырёхвекторы*, приводящие к инвариантам. В *4-пространстве* законы физики приобретают ковариантную форму, характеризующую сами явления, а не выбранную систему отсчета (логично, верно?) «Относительность» превращается тут в «абсолютность». Получается, что 4-пространство отражает фундаментальную сторону природы.

Заодно обнаруживаются взаимосвязи между понятиями и величинами, в нерелятивистской физике казавшимися разнородными.

Три координаты нашего вектора скорости дополняются до *4-скорости*, которая становится инвариантом, причем безразмерным: длина четырехкомпонентного вектора в любой ИСО равна 1.

Странно: как это величина скорости всегда равна единице?

Не странно, а естественно, длина вектора не может зависеть от системы координат.

Для 4-скорости дифференцирование координат по времени заменено дифференцированием по инвариантному интервалу (так как время само оказалось координатой!)

Существует и 4-ускорение. Интересно, что векторы 4-скорости и 4-ускорения всегда ортогональны.

Произведение массы движущейся материальной точки на ее четырехскорость дает новый инвариант: *четырёхвектор энергии-импульса*. Три его составляющие (p_x, p_y, p_z) – это компоненты вектора релятивистского импульса по координатным осям, а четвертая равна $\frac{\mathcal{E}}{c}$ (\mathcal{E} – полная энергия). Вектор тоже является лоренц-инвариантным: при переходе в другую ИСО его компоненты меняются в соответствии с преобразованиями Лоренца, а длина остается постоянной и равной массе (точнее, mc).

Аналогично трем измерениям пространства и одному – времени, связаны три составляющие векторного потенциала магнитного поля и скалярный потенциал электрического поля. Ну и так далее. Согласитесь, здесь нащупываются фундаментальные закономерности.

Интересно: вектор силы тоже превращается в 4-вектор?

Да. Четвертой (временной) его проекцией оказывается мощность, развиваемая при совершении силой работы. Таким образом, и компоненты силы при переходе к другой ИСО не остаются неизменными!

Честно говоря, все эти четырёхвекторы не очень понятны...

И должны быть предметом отдельного изучения, которое впереди. Здесь цель другая: пояснить, что четырехмерное представление (свойственное СТО) выявляет неожиданные симметрии в природе. Что дает материал для фундаментальных обобщений и осмыслений, куда более содержательный, чем наивные гипотезы малообразованных любителей науки.

Что такое общая теория относительности?

Вы упомянули об ускорении... Разве в СТО не рассматриваются только равномерные прямолинейные движения? А ускоренные – прерогатива общей теории относительности, ОТО.

Такое мнение нередко услышишь от несведущих. Впрочем, данную оплошность доводилось заметить и у именитых физиков. Естественно, что в СТО рассматриваются любые, в том числе и ускоренные, движения – так же, как и в механике Ньютона.

А ОТО – не что иное как *теория гравитации*.

Я даже читал, что СТО справедлива лишь при отсутствии гравитационных полей. Постойте, вы же упоминали о гравитационных взаимодействиях?

Упомянул в контексте нерелятивистской механики. Впрочем, притяжение двух тел не противоречит и СТО. Другое дело, откуда выводится эта сила притяжения.

Разве не из закона всемирного тяготения?

Не забывайте, что закон, предложенный Ньютоном, приближенный. В отдельных случаях отклонения от него наблюдаемы. Например, движение перигелия орбиты Меркурия.

Но СТО все-таки рассматривается вне полей тяготения?

Дело в том, что возникает проблема с инерциальными системами отсчета. Говоря об ИСО, подразумеваем оси координат, уходящие в бесконечность сколь угодно далеко, согласны?

Да, хотя не выглядит ли такое... чересчур надуманным, что ли?

Действительно, нет оснований распространять наш ограниченный опыт на космологические масштабы. В преобразованиях Лоренца – оси новой системы отсчета считаются параллельными осям прежней, но разве мы уверены, что во Вселенной могут в принципе существовать прямые, которые никогда не пересекутся, сколько бы ни продолжать?

Вся возня с преобразованиями Лоренца должна иметь скорее локальный смысл.

Вы и говорили, что система отсчета это просто лаборатория?

Замечание кстати. Лаборатории, с которыми мы имеем дело, ограничены в масштабах, не стоит их мысленно продлевать в неизведанные дали.

Но если понимать инерциальные системы в подобном ракурсе, в категорию ИСО неожиданно попадут такие, каких мы не предусматривали. А именно – системы, свободно падающие в поле тяготения.

Помните определение ИСО? Система отсчета, в которой соблюдаются законы механики Ньютона – для малых скоростей. Так вот, опыты внутри орбитальной космической станции вполне подтверждают законы механики (в локальном масштабе, конечно).

Хотя эта система не похожа на то, что мы представляем себе, говоря об ИСО.

Почему не похожа?

Потому, что две любые ИСО движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. Чего не скажешь о двух орбитальных станциях! Ситуация, явно выходящая за рамки преобразований Лоренца.

Вот почему, говоря о СТО, предпочитают отвлечься от гравитационных полей. Которые в СТО попросту не лезут.

Например?

Например, потому, что напряженность гравитационного поля имеет чисто кинематическую природу: это ускорение свободного падения.

Возьмите тело, падающее в однородном поле тяготения. Его ускорение не может быть константой (иначе скорость должна превзойти световую). Получается, однородное поле неоднородно? Нонсенс.

А, может, так оно и есть?

Но ведь неподвижное тело, помещенное в точку, в которой первое снижает ускорение, начнет ускоряться нормально!

Так все-таки: падающая в гравитационном поле лаборатория является настоящей инерциальной системой или нет?

В отношении механических опытов – да, является. Можно выдвинуть гипотезу о том, что она является таковой в отношении любых опытов. На этой базе и построена общая теория относительности.

Знаю, что она очень сложна. Можно кратко сказать, в чем она состоит?

Кратко – можно. Ее результаты говорят о том, что *материя* (вещество или поле) является причиной геометрической *кривизны пространства-времени*. То, что мы называем гравитацией, именно и является такой кривизной.

Это выражается *уравнениями Эйнштейна*.

Поясните на житейском примере: яблоко падает вертикально на голову Ньютона – и что тут искривляется?

Свободно падающее тело движется в 4-пространстве по *геодезической* – своеобразному аналогу прямой линии. Что соответствует в псевдоевклидовом пространстве (точнее говоря, в псевдоримановом) такому движению между событиями старта и финиша, при котором собственное время окажется наибольшим.

При слабой гравитации, когда действителен и обычный закон всемирного тяготения, материя «искривляет» в основном время. А именно: чем ближе к центру Земли, тем медленнее местное время.

Ну да, я слышал: время замедляется в сильных гравитационных полях?

Величина поля ни при чем. Замедление местного времени связано с низким *гравитационным потенциалом*. Да и связь тут скорее обратная: гравитационный потенциал сам является некоторым выражением кривизны пространства-времени, в данном случае замедления времени.

Яблоко Ньютона, оказываясь в точках все более медленного хода времени, «стремится» проскочить их быстрее, чтобы в меньшей степени укорачивалось итоговое время в пути. Для чего наращивает скорость падения. Объяснение несколько косноязычно, но, надеюсь, понятно.

Но почему ничтожная разница местного времени на разных высотах вызывает столь разительный результат?

Потому, что собственное время тоже в крайне малой степени зависит от способа движения между начальным и конечным положениями. Чтобы повлиять на него, ускорение должно быть заметным.

Согласно ОТО, инертная и гравитационная массы равны – почему?

Две разновидности массы – наследие доэйнштейновской физики, их равенство – точно проверенный опытный факт, бывший, однако, теоретической загадкой. В ОТО никаких двух масс нет.

Движение свободного тела от его массы не зависит. Масса характеризует поведение тела только при действии сил. Гравитация не является силой, это искривление пространства-времени. Тело, движущееся в гравитационном поле, «свободно»! Именно поэтому любое тело движется в нем совершенно одинаково, а масса ни при чем.

Конечно, если считать вслед за Ньютоном, что гравитация – сила, тогда одинаковость ускорений является следствием необъяснимого равенства «инерционной» и «гравитационной» масс...

Что такое горизонт событий?

Кстати, я читал про горизонт событий, название интригует. Что это такое?

Чтобы разобраться, удобно рассмотреть так называемое *релятивистское равноускоренное движение*.

Почему не просто равноускоренное?

Такого существовать не может: при движении тела с постоянным ускорением рано или поздно должна быть превышена скорость света, что невозможно.

Тело, движущееся под действием постоянной силы, вовсе не обладает постоянным ускорением. Однако его ускорение a неизменно в каждой мгновенно-сопутствующей ИСО, то есть, в той ИСО, в которой тело в данный момент имеет нулевую скорость. Иными словами, двигатель звездолета дает ему ежесекундно фиксированный импульс. А значит, фиксированную прибавку скорости, но только если считать, что в предыдущую секунду звездолет покоился.

Я полагаю, с точки зрения стороннего наблюдателя ускорение такого звездолета будет уменьшаться по мере набора скорости, приближения ее к световой?

Разумеется, так. Задача решается интегрированием, и получается следующий закон изменения координаты в ИСО:

$$x = \frac{c^2}{a} \left(\sqrt{1 + \frac{a^2 t^2}{c^2}} - 1 \right).$$

При $t \rightarrow \infty$ имеем: $x \approx ct - \frac{c^2}{a}$. Сравните с законом распространения света вдоль оси x : $x = ct - x_0$, где $-x_0$ – координата света в начальный момент времени.

И что же?

А то, что свет, испущенный позади на расстоянии больше, чем $x_0 = \frac{c^2}{a}$ от точки старта звездолета, никогда его не догонит. Экипаж видит «назад» только до этой границы! На горизонте время для него останавливается.

Подобный «горизонт событий» имеется и у *черных дыр*, которые являются решениями уравнений общей теории относительности. Только там остановка времени вызвана гравитацией.

Существует ли замедление времени?

Замедление времени движущихся часов относительно покоящихся кажется мистикой. К тому же, как говорят, вторые часы идут медленнее, чем первые, но и первые медленнее, чем вторые... Противоречие логике?

Нет, просто – иллюзия понимания вместо подлинного понимания.

Вообще замедление времени выглядит абсурдом. Непонятно, что может повлиять на процессы, чтобы они происходили медленнее?

Ничего. Если часы идут медленнее, их надо отдавать в починку.

Вы снова озадачиваете. Отрицаете замедление времени при движении, о чем написано во всех книгах?

«Замедление времени» есть некое словесное клише. Следует четко понимать, что оно означает. Строго говоря, изменяется вовсе не «время», а координатное представление промежутков времени.

Время движущейся материальной точки (частицы, тела) можно отсчитывать часами, находящимися при точке, тогда оно называется *собственным временем* τ .

Выходит, время всегда собственное: чем же другим можно его отсчитывать?

Можно отсчитывать его по часам системы отсчета, в которой рассматривается частица. Это будет *координатное время*.

Начало промежутка времени фиксируем по условным координатным часам, против которых находятся движущиеся часы. Просто берем временную координату данного события t_1 . Конец промежутка (вторые условные координатные часы) имеет координату t_2 . Если имеем в виду ИСО, то промежуток координатного времени $t_2 - t_1$ всегда больше, чем собственного τ (насчитанного движущимися часами), в этом и состоит пресловутое «замедление времени», и более ни в чем. Фактически, тему можно закончить!

Что одни часы идут быстрее или медленнее других – СТО ничуть не утверждает. Невозможно прямое сравнение хода взаимно движущихся часов, можно лишь однократно сравнить показания, когда часы на миг поравняются – но что это даст?

А если одни часы затормозить и приложить к другим?

Тогда, конечно, они будут идти одинаково – просто по определению, раз являются часами.

Однако имеет смысл сравнение хода интересующих нас часов со *многими* часами некоторой ИСО – по мере того, как первые будут пролетать мимо цепочки вторых. И тогда окажется, что первые часы все больше отстают, как было сказано.

Так что же в итоге?

1. Никакого логического противоречия нет – сравнение времени несимметрично. Промежуток времени, протекший по одним часам, сопоставляется последовательно с показаниями разных часов.

С одной стороны фигурирует собственное время, то есть длительность реальных процессов материальной точки. С другой – *временные координаты* данной точки в некоторой системе отсчета, то есть, координатное представление этой длительности.

2. Не имеют смысла вопросы, которые часто слышишь: это реальный эффект или кажущийся? Эффект измеримый, фиксирующийся инструментально – именно так, как описано.

3. Ходячее утверждение: «в движущейся ИСО время замедляется» – надо воспринимать с осторожностью. Движение относительно, и оттого, что движущиеся часы мы сочтем, напротив, неподвижными, ничего не изменится: они все равно будут отставать от меток движущейся координатной разметки. После того, как избрали конкретную ИСО, движение и «замедление времени» становятся, так сказать, абсолютными.

Замедление времени следует из преобразований Лоренца?

Да, легко получить соотношение: $t_2' - t_1' = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - V^2 / c^2}} = \gamma(t_2 - t_1)$.

Не получается ли, что время ускоряется? Умножается на коэффициент, больший единицы.

Нет, конечно. Преобразования Лоренца относятся к событиям. В данном случае события – два «тика» часов.

$t_2 - t_1$ – длительность «тика» в той ИСО, в которой часы неподвижны (а иначе – почему мы сократили члены с координатой?) То есть, в сопутствующей ИСО. А значит, это собственное время τ .

$t_2' - t_1'$ – длительность «тика» в другой ИСО, в которой часы движутся. Она больше: часы идут медленнее.

Заметьте, если какие-то события связаны с конкретными часами, то интервал всегда времени подобен. Мы уже говорили – почему.

Существует система отсчета (сопутствующая), в которой эти часы неподвижны, все события происходят в одной точке?

Верно. Любые процессы, касающиеся этих часов, будут занимать *по ним* наименьшее время – по правилу инвариантности интервала (так как расстояние наименьшее: нулевое).

В любой другой ИСО промежуток времени между событиями больше, вот вам и «замедление». Из выражения для интервала снова получится известная формула.

Вы запретили говорить, что одни часы идут быстрее или медленнее других. А как же история с близнецами, один из которых двигался, и по возвращении к дому оказался моложе?

Да, в этом случае окажется, что одни часы показывают меньшее время, чем другие, а сравнение корректно, так как происходит в одной точке. Но это не значит, что часы путешественника шли медленнее! А сам сюжет будет подробно рассмотрен особо.

Какая сила сокращает длину?

Если привести стержень в движение, он сожмется относительно прежней длины, это так?

Вовсе необязательно.

Как же, а релятивистское сокращение длин?

Оно к ситуации ускорения стержня не имеет отношения.

Если каждую точку стержня ускорять по одинаковой программе, стержень сохраняет свою длину. Если же двигатель приделан к одному из концов стержня, последний будет удлиняться или укорачиваться, в зависимости от того, тянем ли за передний конец или толкаем сзади.

Ну, так это обычный «сопромат», а причем тут СТО?

Ни при чем. СТО говорит про различие длин, измеренных в разных инерциальных системах отсчета. С собственно стержнем ничего не происходит, разумеется. Недопонимание вызвано неудачным термином «сокращение» – как будто бы нечто имело поначалу нормальную длину, а затем сократилось.

В той ИСО, в которой стержень движется, он всегда имел «сокращенную» длину.

А все-таки: можно ли это применить к ускоренному телу?

Можно говорить, что сокращение длины ускоренного тела имеет чисто релятивистскую природу, но лишь после того, как действие сил закончится, и динамические деформации снимутся. Что будет лишь в редком случае: тело не имеет остаточных деформаций, упругое, но не абсолютно (а иначе приобретет незатухающие продольные колебания).

Представьте себе сгусток частиц, не взаимодействующих между собой. Если теперь сгусток начал (одновременно для всех) ускоряться однородным полем, то расстояние между частицами (длина сгустка) ничуть не меняется, ведь поле действует на все частицы одинаково.

Откуда берется энергия на релятивистское сжатие? Оно реальное?

Да, реальное – в том смысле, что подтверждается определенными измерениями. Но, поскольку нет динамического сжатия, вопрос о затратах энергии отпадает.

Вообще вопрос хороший. Мы вправе рассматривать тело из любой системы отсчета, его длина, какова бы ни была, физически закономерна. В новой ИСО деформированы и силовые поля, удерживающие частицы тела на определенных расстояниях. Уравнение полей, определяющее размеры стержня, в результате преобразования к новой ИСО должно

приводить к той самой сокращенной длине, которая просто следует из преобразований Лоренца.

Откуда уверенность, что одинаково сокращаются совершенно разнородные объекты, в которых, возможно, действуют разные законы?

Из того, что законы определяются свойствами пространства-времени. Вспомните об относительности одновременности! Время движущегося стержня неоднородно, передний его конец живет в «отставшем» времени, задний же, наоборот, забегает в будущее. «Хвост» сближается с «носом» именно потому, что с точки зрения новой ИСО они находятся в разном времени! Вот и весь нехитрый секрет укорочения.

Теория утверждает, что сокращение длины взаимно. Как такое может быть?

Давайте припомним тот самый шест, движущийся в ИСО сарая, и имеющий по этой причине сокращенную длину.

С точки зрения сарая, «нос» шеста, возможно, еще не достиг выходной двери, а «хвост» в это мгновение влетает во входную. Получается, что длина шеста меньше длины сарая.

Пусть часы хвоста шеста показывают 8:00, но часы, находящиеся на носу, показывают меньшее время – скажем, 7:59 (относительность одновременности). На носовых часах 8:00 будет позже, когда нос уже вылетит из сарая через выходную дверь. То есть, с точки зрения шеста (для которого свои часы ведь синхронны!), когда хвост находится при входе, нос уже преодолел выход. Шест длиннее сарая.

Как видно, никакого противоречия нет.

Рассмотрим теперь формулу, к которой легко прийти из преобразований Лоренца: $x_2' - x_1' = \gamma(x_2 - x_1)$. Что она означает?

Похоже, что расстояние в движущейся ИСО удлиняется, ведь $\gamma > 1$?

Возрастает расстояние между точками событий. Так и должно быть.

Пусть в некоторой ИСО события одновременны (в «нештрихованной»)...

Почему именно в ней?

Потому, что члены содержащие временную координату, сократились. Значит, здесь и расстояние минимально – инвариантность интервала. В любой другой ИСО, движущейся относительно этой начальной, расстояние возрастет.

Вот-вот! А как же сокращение?

Никто и не говорил о сокращении расстояний между событиями. Речь идет о сокращении фиксированных отрезков!

В ИСО, в которой отрезок покоится (в сопутствующей), моменты засечки положения концов не обязаны быть одновременными: точки никуда не денутся! А в любой другой ИСО – события засечек должны быть одновременными, чтобы измеренная разность координат имела смысл длины. Таким образом, $x_2 - x_1$ представляет длину движущегося отрезка: временные координаты событий засечек одинаковы. А $x_2' - x_1'$ может быть только собственной длиной. С «сокращением» все в полном порядке.

По общему принципу, длина отрезка минимальна в той ИСО, в которой события засечки его концов одновременны (промежуток времени минимален). При переходе к сопутствующей ИСО отрезка эти события становятся неодновременными, собственная длина больше.

Раз длина движущегося стержня зависит от выбора ИСО, вероятно, надо все-таки считать ее «кажущейся»?

Получение длины стержня, движущегося в данной ИСО – рядовая учебная задача. Которая, будучи несложной, традиционно рассматривается в учебниках. Никакого са-

кравального значения она не имеет. Просто говорит: вот при такой организации опыта должен получиться такой-то результат. Те, кого он шокирует, могут считать, что это «не настоящая» длина – и на здоровье!

Если мы сфотографируем движущееся тело, оно будет на снимке сжатым?

Нет. Надо учитывать еще и скорость распространения света от разных точек тела до объектива. Строгое решение задачи показывает, что тело в результате отобразится повернутым.

Волновой фронт источника света сферический. При переходе в другую ИСО он сплющится в эллипсоид. Нашли способ обнаружить эфир?

Фронт световой волны останется сферическим в любой системе отсчета. Повторяю, релятивистское сжатие справедливо лишь для «твердых тел». Нередко специально говорят о сокращении *эталонов длины*. Фронт волны – не тело, а всего лишь геометрическое место точек событий. В разном времени положения этих точек изменяются как раз таким образом, что сферичность сохраняется. Давайте свет мы разберем отдельно.

Как себя ведет свет?

Я не понимаю, что будет при движении со скоростью света ($v = c$)? В знаменателях формул Лоренца получается ноль.

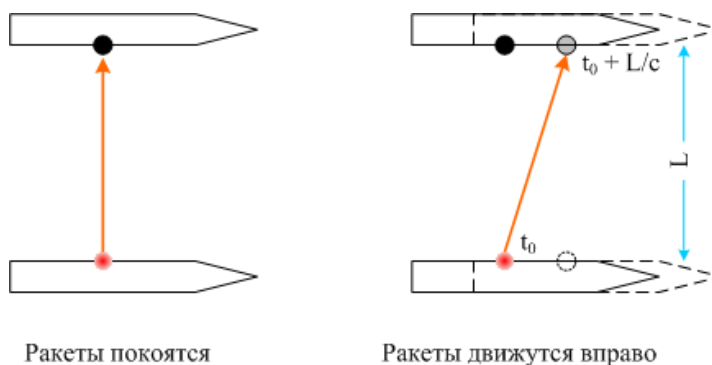
Вопрос некорректен, никакая система отсчета не может двигаться со скоростью света. Не забывайте, что v в формулах Лоренца – относительная скорость систем отсчета!

Но фотон же движется?

Фотон имеет нулевую массу, ему можно. Но связать с ним систему отсчета нельзя. Тело отсчета неподвижно в своей СО, и в случае света было бы противоречие: он принципиально не может покоиться.

Летят рядом параллельными курсами две ракеты. Из одной точно вбок направили луч лазера, попадет ли он в мишень на боку второй ракеты?

Да, попадет: в сопутствующей системе отсчета ракет это очевидно. Но я догадываюсь, с чем связан вопрос: в другой, «неподвижной» ИСО каждая частица света вроде бы должна тогда двигаться не перпендикулярно вектору скорости ракеты, а по гипотенузе, как на рисунках.



Вот именно. Иначе, пока свет преодолевает отрезок между ракетами, мишень улетит же вперед?

Правильно, свет и движется в этой ИСО так, как нарисовано.

Но ведь свет не знает о том, что мы перешли в другую систему отсчета, почему он летит под углом? Лазер направлен прямо, как и ранее.

Отвечу встречным вопросом. Пусть на месте фотона пуля. Ствол ружья торчит из ракеты точно вбок; однако пуля не пролетит мимо мишени лишь только потому, что мы рассматриваем происходящее из другой системы отсчета?

Движение пули зависит от движения ружья. Но движение света не может ведь зависеть от движения источника?

Только скорость (не направление!) света не зависит от движения источника. И это соблюдается: составляющая движения света, перпендикулярная линии движения ракет, меньше c (что как раз и соответствует замедлению хода часов ракет). А результирующая скорость света сохранилась неизменной – за счет появления составляющей, направленной по ходу полета.

Подчеркну, однако, что изображенное на рисунке – не луч света, а траектория движения «частицы света».

Погодите, как это? Разве луч – не траектория движения отдельных «импульсов» света?

Нет, конечно.

Парадоксы СТО?

Простая кинематика. Вы согласились, что пуля полетит по наклоненной траектории. Чему ничуть не препятствует то, что ствол остался перпендикулярным линии движения!

Траектория движения частицы – геометрическое место точек, занимаемых данной частицей в последовательные моменты времени. А видимый луч является, наоборот, геометрическим местом дислокации многих частиц в фиксированный момент! Как видите, разные вещи. Луч упирается вверх, в мишень.

Все равно неясно: как физически лазер, направленный точно в сторону, испускает вспышку света под наклоном?

Разные точки апертуры движущегося лазера в «неподвижной» СО неодновременны: те, что дальше вперед по ходу полета, отстают. Соответственно, фазовый фронт светового излучения формируется так, что направление повернуто туда же – по курсу полета. Подобным образом отклоняют радиолуч в фазированной антенной решетке.

Складывает ли скорости сложение скоростей?

Упростим задачу, отвлечемся от углов. Пусть световая волна и тело движутся навстречу друг другу, какова скорость их сближения?

Скорость изменения расстояния между ними равна $c + v$ – простая арифметика, которую СТО ничуть не отрицает.

Но ведь существует формула релятивистского сложения скоростей. Согласно ей $c + v = c$?

Чепуха. Формула «релятивистского сложения» относится только к переходу в другую ИСО! Если мы остаемся в одной определенной ИСО, работы для нее нет. В самом деле, термин «сложение скоростей» может сбить с толку; лучше говорить о *преобразовании скорости* при переходе к другой системе отсчета.

Так что $c + v$ остается в силе.

Но ведь скорость больше скорости света невозможна?

Разве что-то здесь движется быстрее света? Скорость сближения – это не физическая (то есть, не *координатная*) скорость, просто называется похоже.

Координатная скорость связана с изменением координаты, а не разности координат. При встречном движении тела и света – ничто материальное не движется со скоростью, большей c , ни в какой ИСО.

Как же ничто? Относительно тела свет движется со скоростью $c + v$, разве тут не противоречие постулату?

Ошибка в неосторожном использовании слова «относительно». СТО говорит о постоянстве скорости света в любой ИСО, а отнюдь не «относительно всего»!

Почему «относительно тела» не то же самое, что «в ИСО тела»?

То же самое – только при условии, что в ИСО тела используются часы и линейки, движущиеся вместе с телом, а не первоначальные. Переход к ним из исходной ИСО осуществляется не просто так, а через преобразования Лоренца. Которые и приводят к той самой релятивистской формуле для пересчета скорости.

Общая формула громоздка, ведь если скорость направлена не вдоль относительной скорости систем отсчета, то направление скорости при переходе в новую ИСО меняется.

Очередные фокусы СТО?

Причем тут СТО? Угол скорости не сохраняется и в обычной механике.

Хотя в том частном случае, когда скорость направлена по оси X , формула проста, она-то и наиболее известна:

$$v' = \frac{V + v}{1 + Vv/c^2}.$$

Заметьте: v и V вовсе не скорости двух объектов.

А что же они тогда?

Всегда одна из скоростей, входящих в формулы (например, V) – это взаимная скорость систем отсчета.

Скорость некоторого объекта в «старой» ИСО мы обозначили v . А v' – его скорость уже в «новой» ИСО.

Странно: как векторы скорости могут складываться не по правилам сложения векторов?

Векторы относятся к разным системам координат! Смотрите: v – скорость объекта в первоначальной СО. А V – это скорость старой СО уже относительно новой. Правило же сложения действует в математике, естественно, лишь в одной конкретной координатной системе.

Хотя вообще смысл суммирования скоростей неясен. В прежней механике преобразование скорости могло осуществляться через векторное сложение единственно потому, что время считалось инвариантом. В таком случае преобразование эквивалентно суммированию перемещений, когда правило параллелограмма справедливо просто геометрически.

Вот глупый, наверно, вопрос: система отсчета A движется в системе B с некоторой скоростью. Ну а B движется в A с такой же скоростью?

С такой же – по абсолютной величине. Вопрос не глупый, положительный ответ получается просто из формулы, но, если смотреть глубже, он вытекает из фундаментальных симметрий (на которых и базируется СТО).

Существует ли сверхсветовое движение?

Откуда следует, что невозможно движение со скоростью света?

Возможно: сам свет движется. Кстати, возможно и быстрее света! Но вещество, тело разогнать до скорости света действительно нельзя.

Почему именно тело, что в нем такого особенного?

То, что с ним можно связать систему отсчета.

Пусть тело движется в ИСО со скоростью u . Перейдем в сопутствующую ИСО, где тело покоится. Дадим телу новую скорость v – уже в этой, второй ИСО.

Тогда итоговая скорость тела в первой ИСО должна рассчитываться по формулам «преобразования скоростей». А из них видно, что, каковы бы ни были u и v , они не могут дать c . Добавки скорости в сопутствующих системах отсчета, сколько бы и каких ни было, никогда не приведут к достижению скорости света!

Кстати, из формулы $v' = \frac{V+v}{1+Vv/c^2}$ следует, что если $v=c$, то $v' = \frac{V+c}{1+V/c} = c$: скорость света при переходе в другую ИСО не меняется. Конечно, так и должно получаться.

Я не ослышался, возможно движение со скоростью больше световой?

Да. Например, фазовая скорость электромагнитных волн (да и любых волн) может быть больше c . Сколь угодно большую скорость имеет точка пересечения, например, сжимающихся лезвий ножниц – когда они почти параллельны.

Разумеется, при этом не движется ничто вещественное. Мы имеем дело с движением «геометрического места», условного математического объекта.

И еще не забывайте, что для неинерциальных систем отсчета – в движении с любыми скоростями ничего незаконного нет.

Понимаю, говорим только про ИСО... Для сверхсветовых скоростей формула «сложения» тоже справедлива?

Вполне. И, кстати, здесь возможны любопытные эффекты. Так, если мы пустимся вдогонку за сверхсветовым объектом, то при определенной скорости движения обнаружим, что объект «перебросился» за нашу спину, и удаляется уже назад, а не вперед. Двигаясь заведомо медленнее, мы оставили сверхсветовой объект позади!

Как можно обогнать сверхсветовое движение, когда мы сами можем двигаться лишь со скоростью, меньшей c ?

Сверхсветовой объект движется по пространственноподобной мировой линии. Это значит, что два события из его жизни могут поменяться местами в своей очередности – в зависимости от смены системы отсчета.

В определенной ИСО события будут одновременны (а скорость бесконечной). Пороговая скорость наблюдателя находится из формулы «сложения скоростей»: в знаменателе должен оказаться ноль.

Дело в смене очередности событий: те, что случились раньше (объект нагонял нас со спины) в новой ИСО стали более поздними. Объект движется назад во времени.

Обращение времени возможно!?

Да – для череды пространственноподобных событий. Они не связаны причинно-следственной связью, значит, причинность не нарушается.

Следует подчеркнуть, что никакой сменой системы отсчета нельзя превратить движение с досветовой скоростью в сверхсветовое. Справедливо и обратное!

Так что там с близнецами?

Брат, пустившийся в путешествие, вернулся затем назад к брату-домоседу. СТО говорит, что для путешественника пройдет меньший отрезок времени – он постареет меньше брата. Это и есть парадокс близнецов?

Не парадокс, а просто вывод теории. Кстати, подтверждающийся на опыте.

Парадоксальным считают следующее рассуждение: движение относительно, и путешественник может счесть покоящимся себя. Тогда моложе должен оказаться другой брат – вот и «противоречие».

Ну, я в курсе, что такое рассуждение некорректно. Близнецы неравноправны: тот, кто путешествовал реально, подвергался действию ускорений. Вроде бы задача не для СТО, а для общей теории относительности (ОТО)?

Верно, что близнецы неравноправны. Но задача именно для СТО!

Впрочем, можно поставить эквивалентную задачу так, что ускорение будет вообще ни при чем.

Пусть один из близнецов «неподвижен» – остался на Земле, другой, сверив с ним часы, отправился в путь. Забудем об ускорениях: он может установить часы, просто пролетая с постоянной скоростью мимо Земли. Сверяясь теперь с «неподвижными» опорными часами, раскиданными по пространству и синхронизированными с земными, путешественник отметит, что его бортовые часы все время отстают, как им и положено.

Не понял. Путешественнику, наоборот, должно казаться, что отстают земные часы – для него именно они движутся?

Вы опять путаетесь: отставание часов относительно координатного времени выбранной ИСО – явление не относительное, а абсолютное! Ничего никому тут не кажется. И наблюдатель ни на что не влияет.

Достигнув дальней планеты, космонавт убедится, что накопил отставание времени. Например, по его часам путь занял 10 месяцев, а часы финиша показывают год.

А почему не считать, что Земля (вместе с финишной точкой) ехала в обратную сторону, а космонавт покоился?

Пожалуйста: в ИСО, связанной с ракетой, уже земные часы будут все время отставать относительно часов, «привязанных» к ракете, мимо которых пролетает Земля (то есть по координатному времени ракеты). Через земные 10 месяцев – Земля поравняется с часами, показывающими год: время Земли замедлено в ИСО ракеты.

Хорошо, до сих пор ситуация симметрична. Не логично ли думать, что и при обратном путешествии близнецы сохранят равноправие?

Нет. Просто остановившись на финише, ракета зафиксирует накопившееся отставание времени. А та система отсчета, в которой, наоборот, замедлено время Земли, продолжает себе лететь в глубины космоса.

Ясно, что при путешествии назад все аналогично: снова накопится отставание времени.

Значит, все-таки причина в торможении и повторном ускорении?

Допустите, что никакой остановки на финише и обратного ускорения нет. А просто показание часов движущегося от Земли путешественника перенесли на часы третьего брата, летящего, наоборот, к Земле (в момент, когда он поравнялся со вторым). Этот «посланец» второго – все равно привезет на Землю отставшее время.

А если рассматривать Землю?

Земля не меняла скорости в инерциальной системе отсчета (в любой). В этом и состоит неравноправие близнецов.

Изменение скорости это ускорение, и если все-таки его учитывать?

Пожалуйста. Рассматриваем события расставания и встречи близнецов. В 4-пространстве собственное время это длина *мировой линии*.

В евклидовом пространстве отрезок прямой имеет наименьшую длину по сравнению с любой другой линией, соединяющей две точки. В псевдоевклидовом пространстве прямая, наоборот, имеет наибольшую длину. Между двумя последовательными сверками

часов – меньшее время насчитают собственные часы того тела, которое в большей степени отклонялось от инерциального движения. Вот вам и влияние ускорений.

Хорошо, давайте проще: один из близнецов просто летит в далекий космос, другой остался на Земле. Кто из них моложе на самом деле?

На такой вопрос ответа нет. Точнее – ответов сколько угодно разных. Чтобы сравнить возраст (или, что то же самое, показания часов), надо засечь их *одновременно*. События, одновременные в какой-то ИСО, являются пространственноподобными; что можно о них сказать?

Помню: в разных системах отсчета любое может оказаться случившимся раньше или позже, да?

Ну, вот и ответ: все зависит от системы отсчета. В частности, в сопутствующей ИСО одного из близнецов (любого) другой моложе. ИСО равноправны, потому и ситуация симметрична.

Когда путешественник улетает, время Земли для него замедлено. Но, вернувшись, он обнаруживает, что все наоборот: отстало его время. Получается, что в течение его разворота время Земли быстро прокручивается вперед! Фантастика?

Время Земли это собственное время, и оно, конечно, не зависит от путешественника. Дело в другом: в зависимости от смены систем отсчета изменяются временные координаты событий. Если (после разворота) путешественник пожелает сменить систему отсчета на сопутствующую – в ней время домоседа, и в самом деле, сдвинуто вперед. Было сдвинуто изначально, а вовсе не «прокрутилось»!

Даже в школьной физике при смене системы отсчета изменяются координаты и скорости. При торможении автомобиля – в его сопутствующей СО тормозит, наоборот, Вселенная, и это не кажется фантастикой! Менее привычно, что может измениться и временная координата.

Существует сколько угодно систем отсчета, и, переходя между ИСО, мы просто пользуемся уже другой системой временных координат. На часы дальней точки это не оказывает влияния, конечно.

Впрочем, все это слова, требующие подтверждения математикой. Соответствующие выкладки проделаны в Приложении 1 – хороший повод попрактиковаться в применении преобразований Лоренца.

Говорят о симметричном парадоксе близнецов: оба брата стартуют в обе стороны, и также одновременно возвращаются. Что получится?

Собственное время в момент встречи одинаково – просто из симметрии задачи.

Замедляется ли время мюонов?

Пример с длиной пробега мюонов упоминается в любой книжке по теории относительности. Он действительно связан с СТО?

В самом деле, одной из иллюстраций СТО считается сюжет с длиной пробега короткоживущих элементарных частиц, например, мюонов, образующихся в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей.

Я знаю, что у мюонов малое время жизни, за которое они могли бы пробежать всего несколько метров. Зато они имеют релятивистские скорости, и благодаря замедлению времени все-таки успевают достичь земной поверхности, так?

Вы верно сформулировали.

Просто повторил вычитанное из книг, но сам не очень уверен.

Что вас смущает?

Как-то слишком в лоб. Время замедляется, значит, пролетит большее расстояние. А, может, наоборот: время меньше – значит, и расстояние меньше?

Время жизни частицы – это собственное время: сама частица является своеобразными часами. В любой другой (в данном случае – земной) ИСО оно больше – «часы» частицы идут медленнее. Раз время больше, значит, и расстояние в этой ИСО будет пройдено большее.

Хорошо, но ведь мы можем считать, что частица покоится, а Земля движется ей навстречу! Все будет наоборот?

Точнее сказать, вы хотите рассмотреть ситуацию в системе отсчета, связанной с частицей.

В сопутствующей ИСО время жизни будет, разумеется, нормальным (собственным). Зато длина пути, летящего навстречу, который предстоит преодолеть, короче – в той же мере. Результат получается точно тем же самым, а ничего не наоборот.

Отсюда видно, кстати, что релятивистское «сокращение длин» и «замедление времени» – две стороны одной медали. Поворота координатных осей в пространстве-времени.

Вы сказали – сокращена длина. Но разве такое сокращение кто-то наблюдал на опыте?

Распад быстрых частиц и есть тот самый опыт. Система отсчета, в которой частица покоится, равноправна «лабораторной», а часы, представленные временем жизни частицы, ничем не хуже любых других.

Как объяснить опыт Физо?

Как связать отрицание существования эфира с опытом Физо, которым обнаружено увлечение света средой?

Именно СТО и дает исчерпывающее описание результатов опыта. А вот эфирную теорию данный опыт хоронит. Помните, что распространение света в движущихся средах – один из камней преткновения прежней физики?

Вы только упомянули, но не пояснили. В чем тут дело?

Пару веков назад проводилось множество опытов со светом в прозрачных средах, например в воде. Были основания считать, что обнаружит себя эфирный ветер. Собственно, эта область исследований связана с очевидными вопросами:

- 1) свет в прозрачной среде – распространяется все-таки в эфире, или уже нет?
- 2) если в эфире, то эфир увлекается движущейся средой, или остается неподвижным?

Результаты опытов не укладывались ни в одну схему, и Френель выдвинул теорию «частичного увлечения эфира». Светоносный эфир все-таки увлекается средой, но лишь частично: степень увлечения тем больше, чем выше коэффициент преломления.

Почему так сложно?

Как раз такая модель объяснила, почему не удастся обнаружить эфир. Хотя сам Френель исходил из некоторых хитроумных рассуждений. В его модель прекрасно лег и опыт Физо, сделанный позже. Современные лазерные гироскопы, где свет распространяется в оптическом волокне, рассчитывают тоже по формулам Френеля!

Получается, эфирная теория подтвердилась?

Увы, нет. По Френелю эфир увлекается в степени, зависящей от коэффициента преломления среды n . Но для разных длин волн показатель разный (*дисперсия света*). Что же выходит: есть множество эфиров, увлекаемых по-разному? Абсурд.

Действительно. Неужели такое не заметили?

Заметили, конечно. Говорили просто про *увлечение света веществом*, а сюжеты эфиров-кефиров отодвинули до поры в сторону. Странная ситуация: формулы Френеля работают, а их физическое содержание непонятно. Эфирное-то толкование провалилось!

А вот из СТО – формулы Френеля прямо выводятся! Их смысл ясен: работает эффект релятивистского «сложения скоростей». Дело не в каких-то свойствах вещества, а в самой скорости, в ее инвариантности.

И как же все получается?

Вернемся к опыту Физо: свет, движущийся в среде (воде), перемещающейся в ту же сторону, распространяется быстрее, чем в неподвижной воде. Он частично увлекается движением.

Проделаем несложные выкладки. Скорость света в прозрачных веществах меньше, чем в вакууме, в n раз (n – показатель преломления): $c_1 = c/n$. Согласно принципу относительности, в покоящейся среде c_1 всегда одна и та же, независимо от того, в какой именно ИСО среда покоится.

Перейдем в другую ИСО – в которой среда движется со скоростью v , пусть – в ту же сторону, что и свет. В новой ИСО скорость c_1 , разумеется, изменится.

Разве скорость света не постоянна?

Инвариантной скоростью является c . Скорость $c_1 < c$ инвариантна, и новая скорость должна вычисляться по формуле «сложения скоростей»: $c_1' = \frac{c_1 + v}{1 + c_1 v / c^2}$. Разумеется, результат будет больше c_1 (но меньше c).

Получили то самое «увлечение». Расчетная величина в точности соответствует результатам опытов.

Выходит, что СТО не отрицает увлечение света средой?

Конечно, нет. Увлечение отсутствует только в пустоте, где отсутствует и сама среда.

А если свет движется против направлении движения среды – что будет?

По той же формуле: $c_1' = \frac{c_1 - v}{1 - c_1 v / c^2}$. Свет как бы тормозится встречным движением среды – но опять же частично.

Заметьте: если мы наблюдаем распространение света в сторону движения прозрачной среды, то видимая скорость света «относительно» среды, как разность скоростей, равна $\frac{c_1 + v}{1 + c_1 v / c^2} - v \approx c_1 + \frac{c_1^2}{c^2} v = c_1 + \frac{v}{n^2}$. Согласно кинематике Галилея, она и является скоростью света в СО среды. Получили формулу частичного увлечения Френеля! Которая, как видим, справедлива лишь приближенно (но в реальных опытах разницы не уловить).

Так что опыт Физо – надгробный камень на могиле эфира.

Аберрация света – эффект абсолютного движения?

Я слышал мнение, что аберрация света звезд опровергает СТО. Вроде бы, она обусловлена эфирным ветром, и дает возможность обнаружить абсолютное движение, например орбитальное движение Земли вокруг Солнца?

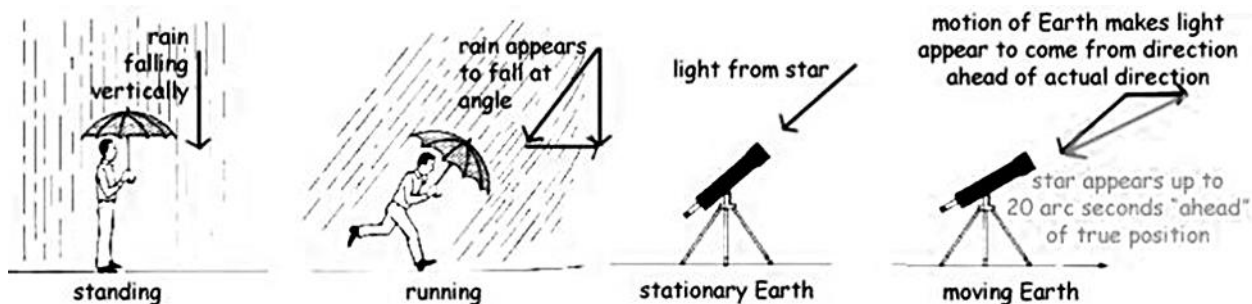
В статье Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» есть параграф, посвященный теории абберации. Как вы считаете, возможен ли был бы анализ абберации с точки зрения СТО, будь это явление несовместимым с теорией?

Аргумент понятен. Но нельзя ли убедиться предметно?

Хорошо. В астрономии абберация – видимое смещение звезд в сторону движения наблюдателя.

Аналогично тому, как прямой дождь окажется для бегущего человека косым (бьющим в лицо)?

Да, таким манером объясняют в популярной литературе, и на рисунке представлен образчик.



Но тут имитация объяснения. Свет – не капли дождя, даже если вспомнить про фотоны. К тому же создается ложное представление, что все дело в трубе телескопа, а вот если бы не она...

А разве не в трубе дело?

Телескоп – инструмент. Который фиксирует явление таким, каково оно есть. Абберация связана с наклоном волнового фронта. Нормаль к фронту и есть направление, на котором мы увидим источник волны.

Хотя не все так просто. Действительно, пусть волновой фронт параллелен траектории движения наблюдателя (звезда «на траверзе»), тогда он вроде бы останется параллельным при любой его скорости!

А все-таки – разве не позволяет смещение положения звезд обнаружить абсолютное движение наблюдателя?

Вовсе нет. По смещению направления визирования мы фиксируем смену сопутствующей системы отсчета, которая не лучше и не хуже прежней.

Тогда можно ли утверждать, что абберация противоречит постоянству скорости света?

Не забывайте, что СТО вовсе не устанавливает неизменность направления света!

Так как в СТО объясняется абберация?

Собственно, к СТО явление имеет мало отношения. Абберация – эффект первого порядка. Такие эффекты обусловлены всегда конечной скоростью распространения взаимодействий. Абберация описывается формулами преобразования скоростей: при переходе в другую ИСО скорость света изменяет направление.

Но можем представить дело нагляднее. По-вашему, звезда находится на том направлении, где ее видим?

Сомневаюсь: пока свет от нее шел, она, возможно, вообще погасла – ведь прошел миллион лет!

Совершенно верно. Звезду мы видим на том направлении, где она была миллион лет назад. Когда излучила свет, который достиг нас только сейчас.

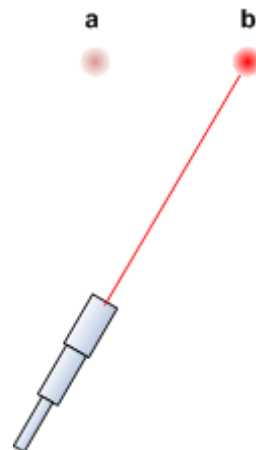
Пусть наблюдатель начал движение, его сопутствующая ИСО движется с некоторой скоростью относительно прежней. Для него источник света изменил свою скорость как раз на эту величину, не так ли?

Допустим...

Кажется странным, что, как только некто начал двигаться, в его новой системе отсчета все звезды Вселенной приобрели такую же добавочную скорость? Но ведь так оно и есть, хотя «здравый смысл» противится! В чем и состоит трудность понимания аберрации.



Наблюдатель, неподвижный относительно звезды, видит ее на направлении, где она находится теперь



Наблюдатель, движущийся вправо, видит звезду там, где она находилась в момент испускания света (*b*), а не там, где она находится теперь (*a*)

Взгляните на рисунки. Пусть звезда (для простоты) покоится в ИСО наблюдателя. Значит, он видит звезду на направлении ее действительного положения теперь.

А если звезды давно нет?

Неважно, пусть точка чем-то отмечена.

Второй наблюдатель движется вправо относительно первого. В его сопутствующей ИСО, наоборот, звезда движется влево.

Ее действительное положение (условное) то же самое. Но миллион лет назад она находилась в смещенной точке! Оттуда пришел свет, что он и наблюдает.

Выявить таким образом свою какую-то абсолютную скорость наблюдатель не может. Просто задумайтесь: если бы Земля двигалась не по замкнутой орбите, а всегда строго прямолинейно – можно ли было бы зафиксировать звездную аберрацию?

Расчет по СТО вносит некоторые поправки второго порядка, но они незначительны.

Выходит, причина аберрации дается простым рассуждением в духе школьной кинематики?

Говоря честно, в нем «закопана» СТО.

Мы приняли само собой разумеющимся, что источник виден на направлении, откуда был испущена волна, достигшая нас теперь. Но, к примеру, для звука это совсем не так. Так что аберрация не вызвана эфирным ветром, а напротив, демонстрирует его отсутствие!

Только СТО с принципом относительности дает право подменить ситуацию с волнами – каплями дождя. Что изначально совсем не очевидно! Заявив, что аберрация имеет малое отношение к СТО, я слукавил.

А как получается с волновым фронтом, который вроде бы не должен зависеть от движения наблюдателя?

Тут-то СТО и помогает разобраться. При переходе в другую ИСО – в старой системе время вдоль оси движения уже неодинаково, оно запаздывает в направлении движения этой ИСО (то есть назад). Если в исходной ИСО волновой фронт был параллелен движению, то в новой – наклонен (позади задержан, а впереди забегаёт вперед).

Как в случае с ракетами?

Именно. Что и соответствует наклону направления на звезду вперед по ходу движения.

Эффект Доплера опровергает СТО?

Верно ли, что эффект Доплера опровергает постулат о равноправии систем отсчета? По частоте доплеровского смещения можно определить, движется ли тело на самом деле, или покоится.

Это не так. Величина доплеровского смещения частоты в СТО зависит только от *относительного* движения источника и приемника волн.

Но я читал про анизотропию реликтового излучения. Эффект Доплера говорит, что Солнечная система движется в сторону созвездия Девы со скоростью 370 км/с. Абсолютное движение?

Она просто движется относительно той системы отсчета, в которой реликтовое излучение изотропно. Точно так же можно двигаться относительно забора. Никакая «абсолютная система отсчета» тут не найдена.

Если источник света движется а приемник покоится, мы будем наблюдать эффект Доплера. Но ведь, согласно СТО, от движения источника света ничего не должно зависеть?

Вы повторяете ошибку. От движения источника не зависит только скорость света. Но эффект Доплера вовсе не связан с изменением скорости волны: меняется *длина волны*. Да и другие параметры излучения (импульс и энергия) очень даже зависят от движения источника.

Тогда можно ли считать, что доплеровское изменение длины волны как-то связано с релятивистским изменением длин?

Нет, применительно к электромагнитным волнам нельзя говорить о «собственной» длине, потому что не существует ИСО, в которой бы волна покоилась.

Однако длину волны можно реально измерить, получится отрезок – разве его длина не сокращается в другой ИСО?

В другой ИСО он не будет уже представлять длину волны, то есть расстояние между нулями поля, взятое в один момент времени – потому что те же события здесь не одновременны. А при поправке на неодновременность как раз и получатся формулы эффекта Доплера.

Говорят, что астрономические явления (например, затмения спутников Юпитера, которыми занимался Рёмер) прекрасно объясняются в рамках преобразований Галилея. Не опровергает ли это СТО?

Нет. Эффекты первого порядка, определяющиеся v/c , не зависят от движения относительно среды распространения (если таковая существует), а только от относительного движения источника и приемника. Потому расчетные колебания периода обращения спутников Юпитера (тот же самый эффект Доплера) практически не меняются от того, считать ли скорость света фиксированной относительно Земли, или относительно Солнца, или инвариантной.

Суть эффекта Доплера в изменении расстояния между источником и приемником. Если оно растет, то должно все больше заполняться волнами, которые из источника вы-

шли, а до приемника не дошли. Накапливающиеся на дистанции волны и соответствуют колебаниям, которых «недосчитывается» приемник. Извиняюсь за столь примитивное разъяснение (но по сути верное).

Но СТО дает же поправки к классическому эффекту Доплера?

Да, дает. В частности, предсказывает «поперечный» эффект (и он обнаруживается в действительности). Разница, обусловленная релятивистскими явлениями, будет только во втором порядке (то есть зависеть от v^2/c^2). Если говорить о наблюдениях Рёмера, при известной скорости движения Земли по орбите поправка получается меньше, чем 10^{-8} . Выявить такую астрономическими средствами непросто.

Сверхсветовое движение джетов?

Кстати, об астрономии: правда ли, что в дальнем космосе обнаружили движение со скоростью, большей световой, и это поставило ученых в тупик?

Не поставило. Первоначальное недоумение было вызвано некорректными расчетами.

При наблюдении выбросов вещества из галактик, квазаров (так называемых *джетов*) измеряли угловую скорость перемещения направления на объект. Умножением на расстояние можно перевести угловую скорость в линейную, результат получался сверхсветовым.

А откуда известно расстояние?

Оценено по космологическому красному смещению. Не доверять оценке – означает ставить под сомнение надежно проверенные вещи.

И в чем же тут дело?

Просто не всегда осознают в полной мере, что такое эффект Доплера.

При движении навстречу источнику сигнала мы наблюдаем увеличение частоты, с чем привычно связывается эффект. Но ведь есть и другая его сторона: уменьшение длительности сигнала.

Почему?

Ну, скажем, потому что уменьшается период, а количество волн в сигнале фиксировано.

Фактически, за счет эффекта Доплера при движении навстречу объекту мы наблюдаем все процессы с ним ускорившимися.

Релятивистский эффект?

Нет, простое следствие конечности скорости света. Сигналу от каждого следующего события требуется проходить все меньшую и меньшую дистанцию, отсюда видимое ускорение.

В повседневной жизни небольшие вариации длительностей не столь заметны, как изменение частоты. Ситуация меняется при движении с релятивистскими скоростями. Для наблюдателя, сближающегося со сгустком плазмы (а квазар выбрасывает их по всем направлениям!) время перемещения джета на заданный угол видится укороченным. Если не учитывать доплер-эффект, получится кажущееся сверхсветовое движение. Все подтверждается строгими расчетами, которые мы здесь опустим.

Все-таки не понимаю: ведь для любого наблюдателя скорость света постоянная и максимально возможная?

Здесь мы видим, как опасно смешивать «наблюдателя» в смысле – систему отсчета, с «наблюдателем» в обычном понимании. Во втором случае на результат накладываются

эффекты, связанные с задержкой распространения сигналов: эффект Доплера, абберация. Которые приходится учитывать дополнительно!

Обнаруживается ли эфир интерферометром Саньяка?

Справедливо ли утверждают, что с помощью вращающегося интерферометра эфир все-таки обнаружен?

Очевидно, речь идет об *эффекте Саньяка*, опыте Майкельсона – Гэля и тому подобном. Действительно, во вращающемся приборе свет тратит различное время на обход кольца по направлению вращения и против. Разность хода зависит от скорости вращения.

Эффект используется в лазерных гироскопах.

Разве эффект не свидетельствует, что есть неподвижный эфир, относительно которого распространяется свет?

Из некоторой точки кольца вышли лучи света, разбежавшись в две стороны. Обойдя окружность в противоположных направлениях с известной скоростью, они сошлись в той точке, где были излучены.

Но кольцо вращалось! За время облета светом окружности – излучатель сместился на некоторый угол, вот и все. Лучи достигли его не одновременно... и причем же тут эфир?

По-другому могло быть только в *баллистической теории*, когда световые corpusculi приобретают дополнительно скорость источника. Но то, что баллистическая теория неверна, хорошо известно (а данным опытом подтверждено).

А разве здесь не обнаруживается абсолютное движение?

Обнаруживается абсолютное вращение. И это ничему не противоречит, вращение обнаруживает и просто ведро с водой – взгляните на ее поверхность!

отя следует оговориться: пояснение, верное для случая света в вакууме, вообще-то ущербно. В гироскопических приборах свет бежит в оптическом волокне. И не обязательно свет: это могут быть акустические волны. Даже просто два тела, обежав вращающееся кольцо с равными (относительно кольца) скоростями в противоположных направлениях, придут в точку старта не одновременно – чудеса! Уж тут-то эфир совсем не при делах.

Не знал про такое... Но как же так: вращающаяся среда ведь увлекает за собой волны?

Увлекает лишь частично. Помните опыт Физо?

Фундаментальная причина прежняя: релятивистское «сложение скоростей». На каждом малом отрезке кольца скорость объекта в обе стороны, разумеется, одинакова... для наблюдателя, сидящего на отрезке. Но для стороннего наблюдателя – скорость волны (или тела) должна «прибавляться» к скорости собственно отрезка по известной формуле.

Итог тот же самый: условная скорость «относительно» движущегося отрезка, как разность скоростей, в разные стороны уже разная. Вот и весь секрет.

Перейдем на точку зрения наблюдателя на интерферометре: для него на каждом отрезке окружности скорость волны постоянна, а в итоге получается разной?

Причина в неинерциальности системы отсчета, связанной с вращающимся интерферометром. Которая предоставляет нам два варианта для попытки синхронизации часов:

а) либо стандартная синхронизация «по Эйнштейну» на каждом малом отрезке окружности, но тогда цепочка синхронизации попросту не замкнется при обходе всей окружности;

б) либо перенос синхронизации из ИСО (к примеру, сигналом из центра вращения), но тогда скорость света будет изначально неодинаковой в направлении вращения и против него.

И то, и другое приводит к отличающимся результатам для путешественников по часовой стрелке и против.

А кажется, симметричной окружности ничего не бывает?

Только кажется, что ситуация симметрична. Во вращающейся системе возможно внутренними средствами определить направление вращения – факт, известный и из обычной механики. Взять хотя бы силу Кориолиса, которую никто ведь не приписывает «эфиру»!

Откуда берется релятивистская динамика?

До сих пор вы почти не упоминали о движении материальных точек и тел – почему?

А давайте я задам встречный вопрос. Специальная теория относительности – теория чего? О чем она? Каково ее содержание?

Наверно, это механика, альтернативная классической?

Во-первых, механику принято делить на классическую и квантовую. В таком аспекте релятивистская тоже «классическая».

А главное (придется напомнить), СТО это *теория пространства-времени*. В данной роли она, по сути дела, исчерпывается уравнением, справедливым в инерциальных системах отсчета:

$$(c\Delta t)^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = \text{инвариант.}$$

Почему тогда в книжках изложение теории не заканчивается в этом месте, на второй странице?

Дело в том, что свойства пространства-времени, устанавливаемые СТО, приводят к изменению механики, по умолчанию основанной на другом принципе:

$$\Delta t = \text{инвариант.}$$

Так что, по традиции, при изложении СТО рассматривается также и «новая» механика. А вот электродинамика в свете СТО ничуть не меняется, наоборот, избавляется от проблем, которые усматривались ранее (что будет у нас отдельной темой). Уравнения Максвелла верны в любой ИСО – данное положение даже можно принять за постулат теории.

Откуда вообще берется релятивистская динамика?

Повторю сказанное ранее. Выводится из двух пунктов:

1) преобразования Лоренца переводят инерциальную систему отсчета в инерциальную;

2) в ИСО для материальной точки справедливо: $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ (закон Ньютона) при $v = 0$.

Мы строим ведь не на пустом месте. Законы Ньютона по-прежнему должны быть верны в ИСО для малых скоростей.

Допустим, тело движется со скоростью v в некоторой «лабораторной» системе отсчета. В другой, сопутствующей ИСО, где тело покоится, обязан выполняться обычный закон Ньютона:

$$\Delta v' = \frac{F}{m} \Delta t'.$$

Теперь вернемся к лабораторной ИСО (считая, что сила действует вдоль вектора скорости). И вот что обнаружится.

Первое. Промежуток времени воздействия силы на тело в лабораторной ИСО Δt больше: $\Delta t = \Delta t' \gamma$.

Разве?

Конечно, ведь для тела $\Delta t'$ это собственное время, которое всегда меньше.

Второе. Приращение скорости Δv в лабораторной системе меньше: работает правило «сложения» скоростей, и $\Delta v = \frac{\Delta v'}{\gamma^2}$ (легко выводится нахождением производной).

Отсюда получаем формулу динамики (для тела, обладающего скоростью v):
$$\Delta v = \frac{F}{m\gamma^3} \Delta t = \frac{F}{m} \Delta t (1 - v^2/c^2)^{3/2}.$$

Что за странная формула?

Пришли к так называемой «продольной массе» по Эйнштейну и Лоренцу: $m_{\parallel} = m\gamma^3$. А если сила действует поперек вектора скорости, тогда придется учитывать «поперечную массу» $m_{\perp} = m\gamma$. Этими архаическими понятиями сейчас не пользуются (хотя из формулы для Δv интегрированием как раз получаются выражения для релятивистского импульса и энергии). И вообще принято, что масса не изменяется при переходе между ИСО – *инвариантна*.

Из разницы формул для продольного и поперечного действия силы получается, что классический закон Ньютона в форме $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ несправедлив. Векторы силы и ускорения в общем случае не совпадают по направлению!

Вы приняли, что сила при переходе в другую ИСО осталась той же самой. А может, как раз она меняется?

В общем – меняется, и мы даже об этом говорили! Сила прямо выводится из релятивистского импульса, как производная по времени.

Но при рассмотрении движений и сил исключительно вдоль одной оси – сила сохраняется. Опять-таки следствие фундаментальных симметрий, иначе пришли бы к нарушению закона сохранения импульса. В то время как данный закон выражает фундаментальное свойство пространства – его однородность.

Импульс это ведь: $p = mv$?

В такой форме не будет соблюдаться закон сохранения импульса.

Рассмотрим два тела одинаковой массы, одно покоится, другое летит от него со скоростью $0,99c$. Пусть тела как-то растолкнулись, и прежде неподвижное тело приобрело скорость $0,1c$. По-вашему, ровно на столько же должна увеличиться скорость второго тела, то есть стать...

...больше скорости света?

Вот именно.

Релятивистский импульс определяют через 4-скорость (вместо обычной скорости), и в результате он выглядит так: $p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = m\gamma v$. Здесь подобных парадоксов нет. Ну а для малых скоростей имеем знакомое по школе выражение.

Растет ли масса с увеличением скорости?

Вы сказали, что масса от скорости не зависит. Почему же из учебников мы знаем про релятивистский рост массы?

Это взгляд устаревший.

Да, я слышал; упоминают статью академика Окуня. Получается, что до него все ошибались?

Нет, академик ничего нового не открыл. Все дело в соглашении: что считать массой.

Поначалу за массу принимали $m = F/a$ (выражение через силу и ускорение). Но данная величина оказалась «неизотропной» – вспомните продольную и поперечную массы.

Бред вообще-то.

Потому такие понятия долго не продержались.

Затем было решено выражать массу через импульс – как $m = p/v$. Уже другая масса, так называемая *релятивистская*.

Но почему «другая», ведь в обычной механике это одна и та же величина?

Но не в релятивистской динамике!

Запишем в таком виде: $dp = m dv$. Поделим на dt , и получим: $\frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt}$. Но $\frac{dp}{dt} = F$, $\frac{dv}{dt} = a$, отсюда $F = ma$.

Не говорил ли я об этом?

Но это верно только при постоянной массе m ! У нас же масса сама зависит от времени при приложении силы, поэтому исходное равенство ошибочно.

В СТО $p = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, но считая, что все-таки должно быть: $p = mv$, ввели *релятивистскую массу* $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$. Здесь m_0 – стандартная масса, которую называли *массой покоя*.

Формула, известная по любому учебнику.

В основном по старому учебнику. Сейчас понятие релятивистской массы не применяется, а массу считают независимой от скорости – инвариантной. В самом деле, для чего второй множитель в формуле $p = m \frac{v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, зависящий только от скорости, разбивать на две части, относя одну к массе?

Чем все же не угодила релятивистская масса?

Начнем с того, что релятивистская масса это просто полная энергия (с точностью до коэффициента c^2), как далее увидим. Какой смысл в дублировании понятий?

Есть и еще причина. Современное изложение СТО и теории поля базируется на математическом аппарате *тензоров*. Все фундаментальные физические величины должны являться тензорами.

Если масса – скаляр (тензор нулевого ранга), она обязана быть инвариантом. То есть, не изменяться при переходе к другой координатной системе.

Как только во всем этом не запутываются?

Имейте в виду, что при $v \ll c$ любая из этих «масс» равна обычной, нерелятивистской.

Еще заметьте, что инвариантная масса не аддитивна: масса системы не обязательно равна сумме масс составляющих! Правда, если пользоваться устаревшим понятием релятивистской массы, то вот она аддитивна (поскольку представляет собой энергию).

Странно, что масса может быть не аддитивна. Ведь она как бы количество вещества?

Такой механистический взгляд приходится отбросить. Фундаментальная причина в том, что СТО, помимо вещества, учитывает и поля. Либо масса будет неинвариантной, либо неаддитивной; ни то, ни другое не отвечает идее о «количестве вещества».

Выходит, сейчас массой считают то, что раньше называлось массой покоя?

Применительно к одиночной частице – так. Но в случае сложной системы (состоящей из нескольких частиц, полей) придется учитывать, что «масса покоя» системы не является суммой масс покоя частиц, ну а для полей и волн понятие покоя вообще бессмысленно.

Современное понятие массы (сформулированное в следующем параграфе) универсально.

Но релятивистский рост массы как раз и объяснял, почему тело нельзя разогнать до скорости света: масса стремится к бесконечности. Чем это плохо?

Да, встречаются такие объяснения! Но они идеологически неправильны.

Объект, неподвижный в какой-то ИСО, ни в одной другой ИСО не может двигаться со скоростью света (тем более, с большей) – следствие преобразований Лоренца. Вопрос кинематики, а не динамики. Заметьте: чтобы ускорить тело, необязательно действовать на него силой. Можно просто сменить систему отсчета.

И почему обязательно тело? Нашим объектом может быть, например, световой зайчик, покоящийся в некоторой ИСО. Вот и получается, что масса ни при чем.

Доводилось читать смехотворные разъяснения, что де и время-то движущегося тела идет медленнее из-за роста массы: отяжелев, все становится неповоротливым...

Кстати уж, ускорение в направлении разгона определяется, как мы видели, «продольной массой», которая вовсе не равна релятивистской!

Вы сказали: что считать массой – дело соглашения... А почему не разобраться, что такое масса на самом деле, раскрыть ее сущность?

Подобные взгляды проистекают из непонимания, что такое *определение* в науке. Суть в том, что некоторому понятию (содержательно описанному) присваивают *термин*, т. е. просто слово, для краткости.

Понятия вводятся в контексте некоторой теории. Так, Ньютон ввел массу как коэффициент пропорциональности в законе механики. Но закон оказался неточен, и массу потребовалось переопределять.

Нередко термин имеет еще и второй, обиходный смысл: масса народу, масса хлопот. Отсюда ложное представление, что слово как бы наличествует изначально. А определение лишь «раскрывает его сущность». Таким образом, с определением можно соглашаться, или, наоборот, предложить более адекватное...

Все это плод недоразумения.

Превращается ли масса в энергию?

Об известной формуле Эйнштейна говорят, что она выражает эквивалентность массы и энергии. Слышал и другое: масса может превращаться в энергию. Но ведь это совершенно разные утверждения?

Да, здесь много путаницы. Формула сейчас выглядит так: $\mathcal{E}_0 = mc^2$. Что означает: массе соответствует энергия покоя, то есть, лишь некоторая внутренняя энергия.

Впрочем, если под m иметь в виду релятивистскую массу, то верно и $\mathcal{E} = mc^2$ – для полной энергии. Это устаревший подход.

Так все же: соответствует ли энергии масса?

Соответствует только энергии покоя, то есть, внутренней. Например, масса приведенного во вращение тела станет больше – соответственно приращению его энергии.

Верно ли говорят, что формула была известна до Эйнштейна?

Да. На рубеже двух веков на этой площадке теснились лучшие умы.

Электродинамика дала выражение для импульса волны: $p = \mathcal{E}/c$ (\mathcal{E} – энергия). И считая, что $p = mv = mc$, пришли к знаменитому: $\mathcal{E} = mc^2$. Поскольку не было сомнений в том, что масса аддитивна, Эйнштейн сделал вроде бы логичный вывод: тело, излучающее свет, вместе с энергией теряет и массу. Получилось так, что $\mathcal{E} = mc^2$ выражает универсальное свойство любой материи: массе соответствует энергия, а энергии – масса.

Эйнштейн ошибся?

Нет, если под m понимать массу, вытекающую из соотношения $p = mv$. Но получается банальность: релятивистская масса – просто другое название энергии.

Сейчас физика оперирует фундаментальным уравнением динамики:

$$(\mathcal{E}/c)^2 - p^2 = (mc)^2.$$

Для массивного тела $\mathcal{E} = m\gamma c^2$ – полная энергия, сумма энергии покоя и кинетической, p – импульс (релятивистский).

Можно записать иначе: $(\mathcal{E}/c)^2 - p^2 = (\mathcal{E}_0/c)^2$, где $\mathcal{E}_0 = mc^2$ – энергия покоя.

В теоретической физике часто принимают $c = 1$, тогда уравнение выглядит проще: $\mathcal{E}^2 - p^2 = \mathcal{E}_0^2$, или $\mathcal{E}^2 - p^2 = m^2$.

Кстати, это формула для квадрата длины 4-вектора энергии-импульса, помните?

Помню. Теорема Пифагора, только вместо всех плюсов имеются и минусы?

Точно. Таким образом, масса трактуется как длина (инвариант) 4-вектора энергии-импульса. С точностью до константы c . Вот оно, обещанное определение массы.

Далее: выражение полной энергии $\mathcal{E} = m\gamma c^2$ годится только для массивных частиц, поскольку при $v = c$ знаменатель γ обращается в ноль. Этого можно избежать, подставив из выражения для импульса $\gamma = \frac{p}{mv}$. Получаем вторую полезную формулу: $p = \frac{v\mathcal{E}}{c^2}$.

Имеем два универсальных соотношения, равно действительные и для частиц, имеющих массу, и для волн ($m = 0$). Они образуют систему уравнений, которая позволяет определить значения, например, импульса и энергии, если известна масса и скорость.

Но почему для волн $m = 0$?

Для электромагнитной волны, как мы знаем, $p = \mathcal{E}/c$. Подставьте в уравнение, и убедитесь, что оно дает массу, равную нулю.

Масса может превращаться в энергию?

Звучит странно: масса и есть энергия (покоя) – с точностью до коэффициента.

А как же дефект массы, ядерная энергия, источник которой, как говорят, в уменьшении массы? Аннигиляция?

Давайте разбираться.

При распаде ядра – общая энергия системы ничуть не изменяется (закон сохранения энергии!) Не меняется и суммарная масса.

Энергия перераспределяется: часть энергии (и массы!) ядра переходит к частицам, испускаемым при делении, в том числе квантам электромагнитной энергии. Соответственно, осколки, на которые распалось исходное ядро, имеют меньшую суммарную массу.

Получается, что доля исходной массы ядра как бы «превратилась в энергию». На самом деле, часть энергии покоя (вместе с массой) просто высвободилась. При аннигиляции же вся энергия покоя (и масса) целиком переходит в другую форму – в энергию покоя (и массу) совокупности квантов.

Как же у вас кванты имеют массу? Масса фотона ведь нулевая.

Нулевая – у единичного фотона. Но совокупность фотонов, движущихся в разных направлениях, обладает уже ненулевой массой. Неаддитивность массы, помните?

Но я так и не понял, как это – масса не аддитивна?

К примеру, система состоит из двух одинаковых тел, движущихся встречно с равными скоростями. В целом она покоится (суммарный импульс равен нулю). Тогда кинетические энергии двух тел включаются во внутреннюю энергию системы. Которая, как известно, эквивалентна массе. Масса системы оказывается больше суммы масс!

На месте тел могут быть разлетающиеся фотоны, неважно. Важно, что если общий импульс системы равен нулю, вся ее полная энергия оказывается энергией покоя... то есть, массой.

Как связана «формула Эйнштейна» с СТО?

Все же хотелось бы уточнить. Та самая формула Эйнштейна – следует из теории относительности? Может, она как-то подтверждает теорию?

Имеете в виду $E_0 = mc^2$? На ваши вопросы не существует короткого ответа.

Для начала отметим: в обычной механике абсолютное значение энергии не играет роли. В решении любой задачи участвует лишь приращение энергии. Поэтому можно задать произвольный начальный ее уровень.

Не согласен. Например, кинетическая энергия покоящегося тела обязана равняться нулю. Разве не абсурд – присвоить ей ненулевое значение?

Верно, в данном случае есть веские доводы для определенной *нормировки* энергии. Хотя соглашение, что кинетическая энергия при $v = 0$ равна не нулю, а, к примеру, mc^2 (или любой другой аддитивной константе), не повлияло бы на результаты выкладок. Но и пользы не принесло бы, конечно, только неудобство.

В СТО, наряду с телами, учитываются поля. Что приносит новые соображения относительно нормировки. Энергия электромагнитных волн дается электродинамикой; она тоже исходит из естественного условия: при нулевых полях и энергия равна нулю.

Как может быть иначе?

Тем не менее, здесь некоторая договоренность, упрощающая формулы.

При такой нормировке энергии – явление *дефекта масс* подтверждает знаменитую формулу $\mathcal{E}_0 = mc^2$. При ядерных реакциях недостаток суммарной массы в точности соответствует энергии, унесенной квантами излучения.

Но остается прежний вопрос: формула как-то выводится из СТО? Откуда она, собственно, взялась?

Да, выводится.

Временно забудем про энергию покоя, оставим лишь кинетическую. Тогда можно указать систему отсчета, в которой энергия тела нулевая.

Та, в которой тело покоится?

Конечно.

А вот энергия волн (при «естественной» нормировке) не равна нулю ни в какой системе отсчета! Нонсенс: не могут же существовать различные сорта энергии, преобразующиеся по-разному.

Чтобы достичь единства, пришлось изменить нормировку энергии в механике.

Энергия частицы в форме $\frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ преобразуется по Лоренцу так же, как энергия волн или квантов электромагнитного излучения (отдельная тема, к которой перейдем). Ее назвали теперь *полной энергией*.

Понятно: при нулевой скорости имеем mc^2 . Отсюда Эйнштейн формулу и взял?

Осознание того, что энергия, независимо от ее природы, должна преобразовываться при смене ИСО одинаково, пришло не сразу, как и само понятие полной энергии.

Эйнштейн прямым интегрированием вывел кинетическую энергию, которая получилось равной $\frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - mc^2$ (при $v \ll c$ это даст знакомое $\frac{mv^2}{2}$). Он предположил,

что каждый из членов имеет прямой физический смысл: справа энергия, не зависящая от скорости, следовательно – *энергия покоя*, и тогда слева – энергия покоя плюс кинетическая (то есть, полная).

Просто предположил?

Да. Но это предположение хорошо легло в теорию.

И кстати же приобрела физический смысл четвертая компонента вектора импульса: она оказалось той самой «полной энергией».

Вы все время говорите о кинетической энергии и энергии покоя. А как же потенциальная?

В СТО потенциальная энергия (по определению, зависящая только от взаимного расположения взаимодействующих тел) теряет смысл. Местоположение тела не может повлиять на другие, удаленные тела, пока изменение поля не преодолеет соответствующее расстояние. С этим, в сущности, связано наличие не потенциальных полей (магнитных). Кстати, известно ли вам, что для магнитного взаимодействия не выполняется третий закон Ньютона?

Впрочем, для случая покоя (например, тело, поднятое над поверхностью Земли) классическая «потенциальная энергия» просто дает добавок к энергии покоя.

Какое отношение имеет теория относительности к квантам?

Вы затронули кванты... но вроде бы тема не связана СТО?

Отчасти связана, что мы сейчас и покажем.

Будем пользоваться понятием: *волновой пакет*. Оно вам ясно?

Я так понимаю, что это отрезок волны – определенной длительности, как бы импульс?

Вроде того.

Пусть в упругой среде (скажем, в воде) движется пакет акустических волн с известной энергией. Как считаете: энергия пакета меняется при переходе к другой ИСО?

Мне кажется, что нет, ведь энергия заключена в возмущениях среды.

Вы правы. Конечно, сама масса воды имеет кинетическую энергию, зависящую от того, какую систему отсчета выбрать. Но если энергию воды отбросить, то выбор ИСО не влияет на энергию *возмущений*.

Поскольку электромагнитные волны не связаны с какой-либо средой, следует ожидать, что для них дело будет обстоять иначе.

Энергия пакета в разных ИСО будет разной?

Да, здесь работают преобразования Лоренца применительно к составляющим 4-вектора энергии-импульса. Энергия \mathcal{E}/c преобразуется как время, а импульс p – как координата. Выкладки дают: $\mathcal{E}' = \mathcal{E} \frac{1 \pm V/c}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$. Плюс или минус – в зависимости от того, движется ли новая ИСО навстречу пакету, либо пакет догоняет ее.

Не понял: разве преобразования Лоренца касаются не координат? Причем тут энергия?

Преобразования Лоренца относятся к компонентам любых вообще 4-векторов.

Энергия частицы и волнового пакета преобразуется при смене ИСО по единой формуле, помните? Следовательно, при определенных условиях волна эквивалентна частице.

Присмотритесь к формуле, ничего не узнаете? Подсказываю: она в точности повторяет *формулу релятивистского эффекта Доплера*:

$$v' = v \frac{1 \pm V/c}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

В теоретической физике частота нередко обозначается буквой ν (ню), так как альтернативный символ F и без того нагружен: тут и сила, и поле...

В разных ИСО частота волн различна, соответственно будет меняться пространственная длина и длительность пакета (число волн – инвариант).

Итак, для волнового пакета можно записать:

$$\mathcal{E} = a\nu, \text{ где } a \text{ – некоторый коэффициент.}$$

Энергия пропорциональна частоте? В электротехнике и в радио – энергия зависит от чего угодно, только не от частоты.

Речь идет об энергии одного и того же пакета, только в разных ИСО. При движении навстречу волне растет ее амплитуда: как бы сжимается «гармошка», отсюда связь энергии с частотой.

Предположим теперь, что в природе есть некоторая наименьшая порция электромагнитных волн.

Квант?

Да, так он называется. В таком случае, это порция чего? Какой именно величины?

Энергии, наверное?

Нет, не подходит: энергия не инвариант. Если мы движемся в направлении, сопутствующем кванту, его энергия для нас может сделаться меньше любого заданного значения. Выходит, наименьшей порции нет.

Взгляните несколькими строчками выше: энергия меняется при смене ИСО, частота тоже... А что не меняется?

Вероятно, тот самый коэффициент a ?

Ну, конечно.

Если существует в природе наименьший волновой пакет, его фундаментальной характеристикой должно быть отношение \mathcal{E}/ν . И такая величина в самом деле имеется.

Догадываюсь – постоянная Планка?

Ну, вот и все, что я хотел в этой связи показать.

Зачем делают ускорители на встречных пучках?

Верно ли, что ускорители на встречных пучках (коллайдеры) энергетически во много раз выгоднее обычных, с неподвижной мишенью? И это как-то связывают с СТО?

Так оно и есть.

Но такого не может быть – просто из закона сохранения энергии. Пусть сталкиваются две частицы, тогда работает сумма их энергий. Увеличение в два раза; откуда же может взяться еще энергия?

Вы не учитываете закон сохранения импульса.

Рассмотрим школьную задачу. Разогнанное до скорости v тело врезается в равное по массе покоящееся, общий импульс сохраняется. Скорость центра масс «продуктов взаимодействия» равна $v/2$, и значит, как минимум, половина начальной энергии будет без пользы унесена кинетической энергией «осколков». Даже при чисто неупругом ударе!

Поскольку суть экспериментов именно в осколках, переход к столкновению одинаково разогнанных тел (когда суммарный импульс равен нулю) экономит половину энергии, а то и больше. Импульс не уносит энергию, вся она идет целиком на расщепление, в этом все и дело.

А причем тут СТО?

Пока ни при чем: просто, как видите, даже в обычной механике – здесь просматривается выигрыш.

А с учетом релятивистских эффектов выигрыш возрастает многократно.

Почему?

Причина коренится в известном уравнении:

$$\mathcal{E}^2 - p^2 = m^2, \quad \mathcal{E}^2 = p^2 + m^2.$$

Для ультрарелятивистских частиц $\mathcal{E} \gg m$, а значит, энергия – практически только импульс. При стрельбе по мишени подавляющая часть энергии разогнанной частицы перейдет в кинетическую энергию продуктов столкновения, то есть, будет использована неэффективно.

При столкновении встречных пучков такой эффект исключается.

Что за «электродинамика движущихся тел»?

Боюсь, что тема электродинамики для меня сложна. Стоит ли ее затрагивать?

Составить начальное представление вполне возможно. Понять, почему известная работа Эйнштейна называется «К электродинамике движущихся тел». И над чем ломали голову физики на рубеже XIX и XX веков.

Рассмотрим опыт: заряд движется поперек силовых линий магнитного поля (левый рисунок). При этом возникает поперечная сила.

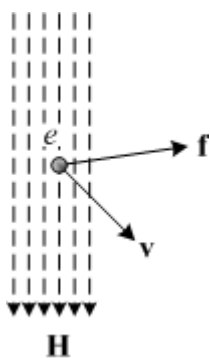
Знаю: сила Лоренца?

Да, и она выражается как $\mathbf{f} = \frac{e}{c} [\mathbf{v}\mathbf{H}]$ – через векторное произведение скорости на величину магнитного поля.

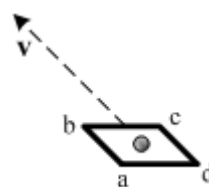
Проблема возникает при переходе в систему отсчета, в которой заряд неподвижен. Сила Лоренца вроде бы равна нулю, но она же не исчезнет от того, что наблюдатель начал двигаться!

Зато теперь движется магнитное поле. Наверно, в этом дело?

Заключение неверное. Поле не может «двигаться», а только меняться.



Сила Лоренца вызывается магнитным полем, отклоняющим движущийся заряд



В рамке с током, движущейся относительно неподвижного заряда, число электронов в проводниках *ab* и *cd* неодинаково

Чтобы понять, в чем тут дело, рассмотрим рамку с током, которая и создает магнитное поле, как на рисунке справа. В новой ИСО движется именно она. На покоящийся заряд рамка может воздействовать только силой Кулона – больше нечем. Заряды в рамке, в самом деле, имеются: они-то и переносят ток.

Разве же они не компенсируются?

Разберемся. Пусть рамка покоится. Пусть даже и тока нет! Заряды подвижных носителей скомпенсированы противоположными – кристаллической решетки, так что рамка в целом электронейтральна.

Если включить ток, электроны станут двигаться в рамке со скоростью дрейфа w : от a к b и от c к d . Заметим: скорости относительно проводников одинаковы по абсолютной величине, рамка осталась нейтральной, так как количество электронов в проводниках ab и cd в любое мгновение одинаково.

О чем я и говорю.

Но заставим теперь саму рамку двигаться со скоростью v . Очевидное действие силы на пробный заряд говорит о том, что в любой момент времени (одновременно в «неподвижной» системе отсчета) число электронов в проводниках ab и cd уже неодинаково! Работает разница сил Кулона.

Как могут электроны распределяться в проводе не равномерно?

Действительно, идея странная: скорость электронов, движущихся от a к b , равна $v + w$, а движущихся от c к d – равна $v - w$. Вычитаем скорость рамки v , и приходим к ситуации неподвижной рамки...

Приходится предположить, что скорости (при переходе между ИСО) не складываются-вычитаются, а преобразуются сложнее. Например, чем большей ожидается результирующая скорость, тем менее она простой суммы. На *ab* она как раз и ожидалась больше (скорости рамки и электронов направлены в одну сторону).

Вы подвели к релятивистскому сложению скоростей?

Вот именно.

Разность скоростей электронов и рамки на участке *ab* меньше, чем на участке *cd*. Чтобы электроны нигде не скапливались, поток с меньшей скоростью должен уплотняться. На *ab* электроны идут «гуще» (с точки зрения лабораторной ИСО)!

Это все объясняет. На *ab* электронов просто большее количество, чем на *cd*! Появился некомпенсированный заряд, кулонова сила действует на наш подопытный заряд.

**Получается, что в одной ИСО (сопутствующей для рамки) – количество электронов на отрезках одинаково, в другой (в которой рамка движется) – различно. Раз-
ве количество может быть относительным?**

Может: количество переменное, поскольку мы фиксируем его не одновременно! В нашей ИСО электроны, вступающие на проводник, и сходящие с него, живут в разное время. В движущейся системе время неоднородно. Если хотите, имеем релятивистское сокращение расстояний в цепочке зарядов – на том участке, где их скорость больше.

Рассуждения качественные, но если применить преобразования Лоренца – все как раз сойдется (придется поверить на слово).

Теперь я понял и опыт с поворотной рамкой, о котором вы упоминали вначале.

Вообще в СТО рассматривается *электромагнитное поле*; при перемене системы отсчета его составляющие изменяются. Иногда можно подобрать систему, в которой магнитное поле полностью исчезает (остается только электрическое). Либо наоборот. Только что мы наблюдали возникновение электрического поля, хотя в первоначальной ИСО его не было.

Все-таки: уравнения Максвелла ковариантны относительно преобразований Лоренца? А то иногда говорят: да, но не в исходном виде, а исправленные, что ли.

Полностью ковариантны. А Приложение 3 позволит продвинутому читателю детально разобраться в вопросе.

Просто сопровождаются неизбежными преобразованиями компонент поля при переходе в другую систему отсчета. Но не удивляет же, что в механике при смене ИСО изменяется скорость, или энергия.

Скажем, электрический потенциал не инвариантен – в 4-мерной геометрии это не скаляр. А напряженность поля – даже и не вектор!

Что за странности? Это противоречит тому, что я изучал...

Значит, учителя щадили вашу психику.

В четырехмерной форме потенциал это 4-вектор. «Скалярный потенциал» является временной компонентой, а на месте пространственных стоят составляющие векторного потенциала магнитного поля.

А почему же поле не вектор?

В трехмерном пространстве оно вектор (точнее, электрическое; а магнитное – так называемый *псевдовектор*)... Но при переходе в другую ИСО (при нетривиальном четырехмерном повороте) не преобразуется как вектор! Электромагнитное поле это четырехмерный тензор 2-го ранга.

Преобразования Лоренца приводят к преобразованию поля (электрических и магнитных составляющих) по соответствующим формулам, в будущем мы их выведем. То есть, при переходе в другую ИСО – поля следует пересчитывать.

И тогда не придется рассматривать сжатие каких-то там цепочек зарядов.

Магнитное поле – релятивистский эффект?

Слышал, что магнитное поле – просто эффект СТО, это справедливо?

Примерно так и получилось в опыте с силой Лоренца. В системе отсчета, связанной с зарядом, магнитного поля уже нет, а его действие подменилось результатом специфического для СТО «сложения скоростей» движущихся зарядов.

Кстати, сила Лоренца представляется отчасти загадочной. Поле по одной оси, скорость по другой... А сила действует по третьей! Из двух измерений рождается третье?

Заблуждение, происходящее от излишне предметного представления магнитного поля – в виде палочек со стрелками. Которое неверно даже математически. Магнитное поле не вектор (точнее, не истинный вектор).

А что же оно тогда?

Магнитное поле – трехмерный антисимметричный тензор 2-го ранга. Его геометрическая природа – не направленный отрезок, а ориентированная площадка.

Почему же в учебниках его изображают вектором?

Для удобства и доступности. Но следует точно очерчивать границы применимости такого упрощения.

Из рисунка с рамкой видно, что никакого «выхода в третье измерение» нет, все происходит в плоскости.

Сила Лоренца имеет релятивистскую природу?

Можно считать и так, поскольку она, как видим, связана с преобразованиями координат. Но фактически здесь имеем искусственное разделение электромагнитного поля: на электрическое (действующее силой, независимой от скорости заряда) и магнитное (остаток).

А полное выражение для силы Лоренца $\mathbf{f} = e\mathbf{E} + \frac{e}{c}[\mathbf{v}\mathbf{H}]$ и есть определение полей, из него (используя преобразования Лоренца) мы в следующей части получим все уравнения электродинамики.

Значит, магнитное поле – и в самом деле, просто релятивистский эффект?

Так можно считать только в случаях, когда магнитное поле создается током. А вот в электромагнитной волне подобного трюка не получается.

Тем не менее, при более глубоком анализе с утверждением можно в каком-то смысле согласиться. Данная тема ждет нас впереди.

Какова все-таки скорость гравитации?

Я читал, что Лаплас оценил скорость гравитации по астрономическим наблюдениям, и получил ее во много раз больше световой. В чем тут дело?

Действительно, Лаплас утверждал, что скорость распространения гравитации (которую он высчитал, анализируя движение Луны) не менее чем в 50 миллионов раз превышает скорость света. То есть, фактически гравитация распространяется мгновенно.

Но Лаплас ошибался. Он рассуждал, что, если скорость распространения гравитации конечна, то Луна, обращающаяся вокруг Земли, должна притягиваться не к текущему ее положению, а к «запаздывающему» – ведь Земля сама движется!

А разве не так? На Луну действует поле, созданное Землей некоторое время назад. Примерно секунду назад (предполагая, что гравитация распространяется со скоростью света).

Так и думали. Получалось, что Луна должна обращаться вокруг Земли не по идеальному эллипсу. Расчеты давали так называемые *вековые ускорения*. Которые наблюдениями отнюдь не обнаруживались!

Впрочем, в системе отсчета Земли ничего такого быть не должно, не так ли?

Похоже, здесь какое-то противоречие?

То же самое имеем в электродинамике – при взаимодействии заряженных тел. Если два таких тела движутся гуськом друг за другом, поле от заднего будет доходить до переднего с большей задержкой, чем, наоборот, от переднего к заднему. Поля как бы сносятся движением!

Значит, силы взаимодействия тел неодинаковы – не выполняется третий закон Ньютона.

Тогда не соблюдается и закон сохранения импульса. Вечный двигатель?

Ну да, центр масс двух тел может самопроизвольно ускоряться.

Впрочем, в ИСО, в которой тела покоятся, ничего такого ведь нет. Значит, идея «сноса» поля (неважно: гравитационного или электрического) просто противоречит принципу относительности, на чем и можно закончить.

А все же, в чем корень заблуждения?

В отсутствии корректного анализа, каково поле движущегося тела.

Применительно к электродинамике правильный результат впервые получили Лиенар и Вихерт – еще до Эйнштейна. И оказывается, что устраняется кажущаяся несимметрия поля.

Значит, никакого сноса поля нет?

Нет. Мгновенное состояние поверхности равных потенциалов движущегося заряда имеет вид эллипсоида: поперек движения он вытянут, а диаметр в направлении движения тот же, что и для неподвижного случая. Эта поверхность движется, сопровождая заряд.

А как же гравитация?

То же относится к гравитационному потенциалу – для случая слабых полей, с которыми, как правило, и имеют дело.

А с учетом того, что в направлении движения сокращаются расстояния – получается, что Луна притягивается к точке «прогнозируемого» положения движущейся Земли, как если бы она продолжала инерциальное движение.

Отклонение движения Земли от инерциального есть, но оно незначительно. И получается, что притяжение направлено к точке ее фактического положения. А не запаздывающего!

Что читать?

Лучшим (наиболее фундаментальным) изложением теории относительности я считаю классическую книгу:

Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. В 10 т. Т. II. Теория поля.

Исторические сведения о теориях, экспериментах, борьбе идей вокруг эфира, приведших к теории относительности, наиболее полно даны в популярной книге:

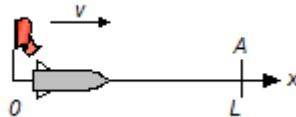
Приложение 1. Решаем задачу на СТО

Теорию не освоишь, не научившись решать задачи. Чтобы понять, как работают преобразования Лоренца, решим здесь простую задачу. Заодно она явится разбором ситуации с «близнецами». И мимоходом получим известные формулы релятивистской кинематики.

ИСО-1: неподвижный старт-финиш

Пусть путешественник стартовал из точки с координатой $x_0 = 0$ со скоростью v . В момент старта ($t_0 = 0$) установлены на ноль бортовые часы. Преодолев расстояние L за время L/v , он мгновенно развернулся – это произошло в точке A с координатой $x_a = L$ в момент $t_a = L/v$ (см. рисунок).

Наконец, путешественник вернулся к финишу (он же старт, координата $x_f = x_0 = 0$) в момент $t_f = 2L/v$ – по часам старта, естественно.



ИСО-1: корабль движется от неподвижного старта вправо со скоростью v

Для начала мы приняли ИСО-1 старта. Задача состоит в том, чтобы рассмотреть ситуацию с позиции путешественника.

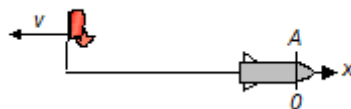
Поскольку предстоит пользоваться преобразованиями Лоренца, а они имеют отношение к событиям, перечислим события задачи:

- событие старта с координатами x_0 и t_0 ;
- событие разворота корабля (координаты x_a , t_a);
- событие финиша (координаты x_f , t_f).

ИСО-2: неподвижный на прямом пути корабль

Перешли в сопутствующую систему отсчета корабля. Корабль неподвижен, точка старта удаляется в противоположном направлении со скоростью v (новый рисунок).

Системы отсчета ИСО-1 и ИСО-2 имеют общее начало – событие старта. Так что координаты его в ИСО-2 те же самые: $x_0' = 0$, $t_0' = 0$.



ИСО-2: корабль неподвижен, старт удаляется влево со скоростью v

Пространственная координата события разворота в новой ИСО $x_a' = 0$ (корабль покоится в начале координат). А вот его временную координату можно пересчитать из ИСО-

1 в ИСО-2, пользуясь формулой преобразований Лоренца для времени, и учитывая, что $V = v$:

$$t_a' = \frac{t_a - \frac{v}{c^2} x_a}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Подставляем $t_a = L/v$, $x_a = L$. Получаем:

$$t_a' = \frac{\frac{L}{v} - \frac{v}{c^2} L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{L}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Что меньше, чем $t_a = L/v$. Сюрприз: получили формулу «замедления времени»! По часам путешественника – времени до разворота прошло меньше, чем по координатному времени ИСО-1, как и ожидалось.

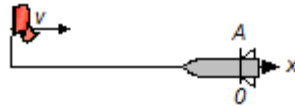
Кстати, в ИСО-2 отрезок пути летит навстречу кораблю со скоростью v . Он проскакивает мимо от момента $t_0' = 0$ до $t_a' = \frac{L}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Несложно определить длину отрезка от точки старта до точки A :

$$L' = v(t_a' - t_0') = L \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Сюрприз номер два: получили формулу «сокращения длины»!

ИСО-3: неподвижный после разворота корабль

Разворот корабля совершился: он находится в той же самой точке A , имея скорость (в ИСО-1), равную теперь $(-v)$. Сменим ИСО-2 на новую, теперь сопутствующую, назовем ее ИСО-3 – см. рисунок.



ИСО-3: корабль неподвижен, старт/финиш приближается со скоростью v

Пересчитаем координаты событий из ИСО-1 в ИСО-3.

Событие разворота

В ИСО-1 координаты события: $x_a = L$, $t_a = L/v$. Пересчитываем в ИСО-3.

$$x_a'' = \frac{x_a - (-vt_a)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{L + v \frac{L}{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$t_a'' = \frac{\frac{L}{v} - \frac{-v}{c^2} L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{L}{v} \cdot \frac{1 + v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Так? Нет, выкладки ошибочны. Неувязка: $x_a'' \neq x_a'$ и $t_a'' \neq t_a'$.

Преобразования Лоренца подразумевают: исходная и конечная ИСО имеют совпадающие начала координат (при $t = 0$ должно быть $x = 0$). Таким образом, мы произвели пока что пересчет не в сопутствующую систему после разворота, а в другую: в систему, которая стартовала в тот же момент, что и путешественник, только в противоположную

сторону. Понятно, что эта система имеет некое постоянное смещение координат относительно ИСО-3.

Чтобы завершить переход к ИСО-3, нужно внести поправки:

$$\text{по координате – вычесть } x_a'' - x_a' = \frac{2L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}};$$

$$\text{по времени – вычесть } t_a'' - t_a' = \frac{L}{v} \cdot \frac{1 + v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{L}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{L}{v} \cdot \frac{2v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Теперь ИСО-2 и ИСО-3 стыкуются. Для того и надо было проверить координаты события разворота!

Событие финиша

В ИСО-1 его координаты, напомним, таковы: $x_f = 0$, $t_f = 2L/v$. Впрочем, пространственную координату финиша в сопутствующей ИСО-3 рассчитывать излишне: она равна, ясное дело, $x_f'' = 0$.

Время же финиша в ИСО-3 (с учетом поправки):

$$t_f'' = \frac{t_f - \frac{-v}{c^2} x_f}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{L}{v} \cdot \frac{2v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2L - 2Lv^2/c^2}{v\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2L}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Таково показание собственных часов корабля к концу путешествия. В то время как по часам ИСО-1 прошло $\frac{2L}{v}$. Что же, именно это и ожидалось!

Событие старта

Интересно пересчитать в ИСО-3 событие старта ($x_0 = 0$, $t_0 = 0$). Опять же с учетом поправок:

$$x_0'' = \frac{x_0 - (-v)t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{2L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = -\frac{2L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$t_0'' = \frac{t_0 - \frac{-v}{c^2} x_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{L}{v} \cdot \frac{2v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = -\frac{L}{v} \cdot \frac{2v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Заметьте: время старта в ИСО-3 отрицательно! При смене ИСО старт произошел «раньше», текущее время старта как бы переместилось вперед.

С точки зрения ИСО-3, расстояние от старта до точки разворота:

$$x_a'' - x_0'' = x_a' - x_0'' = \frac{2L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

и оно пройдено за время:

$$t_a'' - t_0'' = t_a' - t_0'' = \frac{L}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2} + \frac{L}{v} \cdot \frac{2v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Скорость на участке от старта до точки A , пересчитанная к ИСО-3:

$$\frac{x_a'' - x_0''}{t_a'' - t_0''} = \frac{2v}{1 + v^2/c^2} \text{ (проверьте).}$$

Сюрприз третий: перед нами формула сложения скоростей!

Приложение 2. Пространство и время

Собственное время

Рассмотрим объекты нашего «мира» – тела, точнее, материальные точки. Если хотите, пусть они будут элементарными частицами материи.

Примем, что частицы находятся в движении, пока без конкретизации – что это означает. Просто из общего принципа, что движение есть неотъемлемое свойство материи.

Допустим, что к каждой частице прикреплены часы. Или считаем, что часы сопровождают частицу – в том смысле, что движение часов тождественно движению частицы. Или даже, что часы и есть наши частицы.

Под часами будем понимать то, что обычно понимают. С единственным условием: все часы абсолютно идентичны по конструкции (естественное требование к эталонам).

Показания часов частицы назовем *собственным временем* τ этой частицы.

События

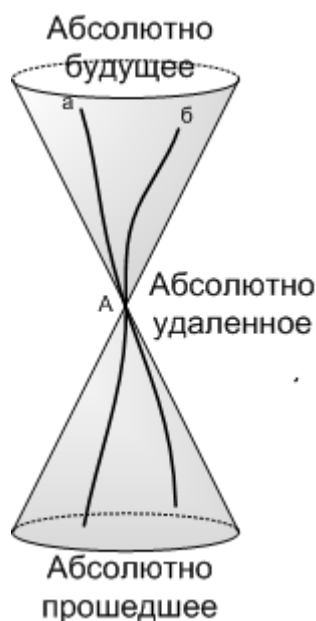
Каждое конкретное значение собственного времени частицы назовем *событием*, совокупность всех таких событий образует существование («жизнь») частицы.

Множество событий из жизни частицы естественно упорядочено по возрастанию показаний собственных часов. Упорядоченное множество этих событий и будем называть движением частицы.

Будем идентифицировать события с точками некоторого *пространства событий*. Пространство это чисто математический объект: *многообразие*. Далее пока не конкретизируем.

Совокупность событий, относящихся к жизни некоторой частицы, отобразится точками пространства событий, которые составляют *мировую линию* частицы. Каждой точке мировой линии (событию) соответствует свое показание собственных часов. Таким образом, мировая линия есть формальное представление движения.

Для любого события A из жизни частицы a можно указать события, которым соответствует большее собственное время. Будем называть эти события *следствиями* A . Каждое из событий, собственное время которых меньше, чем у A , назовем *причиной* A .



Таким образом, мировая линия частицы, в отношении любой ее точки A , разбивается на две части: *прошлое* (события-причины) и *будущее* (события-следствия).

Абсолютно будущее и абсолютно прошедшее

В связи с тем, что пространство событий едино, возможно, что событие A из жизни частицы a окажется также событием из жизни частицы b . Будем говорить о *встрече* частиц a и b . Событие встречи характеризуется парой показаний собственных часов двух частиц. Очевидно, что мировые линии частиц a и b пересекаются в точке встречи A .

Рассмотрим все физически возможные мировые линии частиц, проходящие через выбранную точку A (на рисунке показаны две). Все их точки (события), являющиеся по отношению к A будущим, образуют подпространство многообразия, которое назовем: *абсолютно будущее*. Все точки (события), являющиеся по отношению к A прошлым, образуют подпространство, которое назовем: *абсолютно прошедшее*.

Любое событие A' из абсолютно будущего A является для A следствием, так как возможна мировая линия, которая идет из A в A' . Аналогично, любое событие A'' из абсолютно прошедшего A является для A причиной.

Абсолютно удаленное

Для произвольного события A две области: абсолютно будущее и абсолютно прошедшее – образуют в совокупности подпространство многообразия, которое мы обозначим цифрой I .

Подпространство I не исчерпывает все события. Обозначим подпространство событий, не вошедших в I , номером II . Назовем его *абсолютно удаленное*.

Любое событие подпространства II , отличное от A , не может являться по отношению к A ни причиной, ни следствием (иначе оно вошло бы в I). Иными словами, невозможна мировая линия, лежащая в подпространстве II и проходящая через точку A .

Конечно, мы можем допустить, что область абсолютно удаленного пуста, а подпространство I исчерпывает все события. Тогда у областей абсолютно будущего и абсолютно прошедшего есть граница. И она не может входить ни в одну этих областей (из соображений симметрии прошлого и будущего). То есть, граница является все же отдельным подпространством, которое обладает особыми свойствами. А именно, никакие две точки (события) из этой пограничной области не обладают причинно-следственной связью. Впрочем, с таким же правом можно утверждать, что, наоборот, все события являются друг для друга причинами-следствиями – налицо сингулярность.

События, не являющиеся друг для друга причиной и следствием, назовем *одновременными*. Совокупность одновременных событий будем именовать *пространством*.

Мы получили кинематику Галилея-Ньютона. Далее этот сюжет развивать нет смысла: из-за сингулярности пространства данное представление нефизично.

Время и пространство

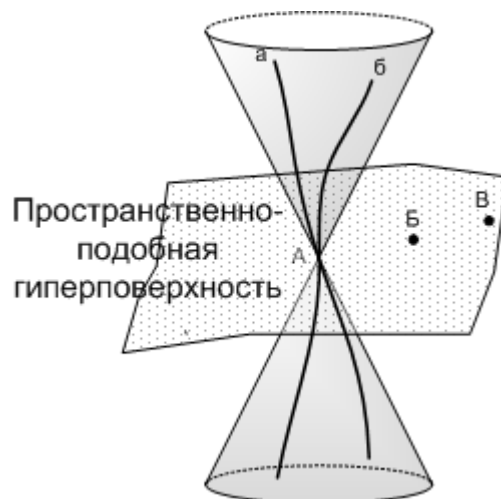
Повторим: никакое событие B , лежащее в области абсолютно удаленного по отношению к A , не может состоять с A в причинно-следственной связи. Говорят, что A и B *квазиодновременны*. «Квази» – потому что двум событиям B и B' , «одновременным» с A , ничто не запрещает быть между собой причиной и следствием.

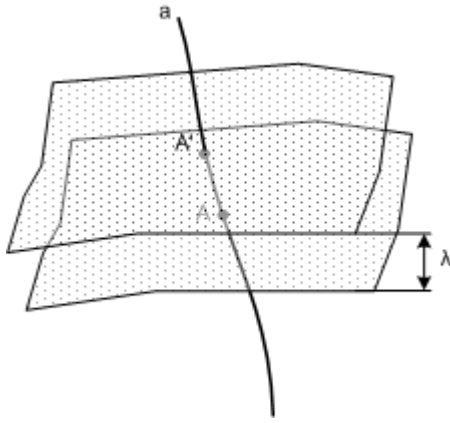
В то же время одновременность рассматривается как *отношение эквивалентности*: если A одновременно и с B , и с B' , то B и B' одновременны между собой.

Потому выделим в этой области (в подпространстве II) подпространство, включающее и A , обладающее следующим свойством. Никакая пара точек (событий) из этого подпространства не может являться друг для друга причиной и следствием. Теперь мы уже вправе говорить, что все эти события *одновременны*.

Назовем такую область *пространственноподобной гиперповерхностью* – см. рисунок. Она обладает важным свойством: любая мировая линия пересекает эту гиперповерхность в единственной точке (очевидно из определения).

Через произвольную точку A , по видимому, возможно провести множество пространственноподобных гиперповерхностей, лежащих внутри II . Для определенности примем какой-то частный класс гиперповерхностей. Так, чтобы гиперповерхности, проходящие через разные точки мировой линии A и A' , как на рисунке, имели совпадающее аналитическое выражение, отличающееся единственным параметром λ .





Назовем этот параметр *временем* (координатным). Таким образом, одновременным событиям соответствует одно и то же время λ . А такую гиперповерхность назовем *пространством*. Пространство, по-прежнему, это совокупность одновременных событий.

Следует подчеркнуть условность, конвенциональность понятий пространства и одновременности: они зависят от выбора конкретного класса пространственноподобных гиперповерхностей.

Пространство-время

Время λ можно рассматривать как параметр движения конкретной частицы: переход от одного события к другому соответствует возрастанию λ . Но сейчас мы докажем его универсальность для всех возможных частиц.

Гиперповерхность (пространство), пересекающая мировую линию частицы a в точке A , пересекает также и мировую линию частицы b , если она проходит через ту же точку A .

Поскольку бесконечно удаленное является атрибутом события (а не частицы), а событие здесь одно, следовательно, та же самая гиперповерхность образует пространство и для частицы b . Таким образом, время λ служит параметром движения также и частицы b .

Но мировая линия b может в свою очередь где-то пересечься с мировой линией c , и так далее. Приходим к выводу, что пространственноподобная гиперповерхность, проведенная через одно произвольное событие, пересекает все возможные мировые линии. А его параметр – время λ – служит универсальным, независимым параметром движения всего нашего «мира».

Этим оно отличается от собственного времени, которое параметризует движение только данной конкретной частицы. Ведь собственные часы это интегратор, и $\Delta\tau = \int d\tau$ – длина мировой линии (в некоторых единицах). Выражение ничего не дает, так как $d\tau$ не есть полный дифференциал. Промежуток собственного времени $\Delta\tau$ между событиями A и B для каждой мировой линии свой.

Если же выразить τ через независимый параметр λ , это дает возможность определить $\Delta\tau$ ($d\lambda$ является полным дифференциалом).

Выбранный класс пространственноподобных гиперповерхностей, параметризуемых с помощью некоторого параметра λ , называют: *пространство-время*.

Заметим: величина λ является «как бы временем», не имеющим пока физического содержания, потому что не привязана ни к какому измерительному прибору (часам). Но это можно сделать.

Инерциальное движение

Рассмотрим два события A и B на мировой линии одной частицы. Будем рассматривать вообще все возможные мировые линии, проходящие через эти две точки (им соответствуют движения с двумя точками встречи частиц).

Пусть наши два события разделены промежутком «времени» $\Delta\lambda$. Как упоминалось, промежуток собственного времени между данными событиями $\Delta\tau$ для каждой мировой линии свой. Впрочем, τ монотонно зависит от λ . И если бы нашлось некоторое особое, выделенное движение, то его собственным временем можно было бы подменить λ .

Рассмотрим множество промежутков собственного времени $\Delta\tau$ для всех возможных движений между A и B . Очевидно, что это множество ограничено снизу: $\Delta\tau$ не может быть отрицательным, и даже равным нулю, если $A \neq B$.

Мы утверждаем, что это множество ограничено и сверху. Что имеется одно особое движение между A и B , для которого собственное время $\Delta\tau$ максимально среди других допустимых движений. Это утверждение ниоткуда не вытекает логически; можно считать, что оно – вывод из опытов.

Это выделенное движение будем называть *инерциальным*. Оно нужно для того, чтобы его собственные часы выступили в качестве измерителя параметра λ .

В самом деле, в уравнение гиперповерхности (пространства) можно подставить $\lambda = f(\tau)$. Имеется в виду собственное время частицы, движущейся инерциально. Тогда универсальным параметром движения всего «мира» выступит собственное время частицы, движущейся инерциально. Назовем его *временем ИСО*.

Инерциальное движение не уникально: выберем другую пару точек (событий), для нее тоже будет существовать инерциальное движение, но уже другое, конечно. А значит, и другое время. Выбор какого-то конкретного времени – дело произвола. В этой связи говорят о выборе *тела отсчета* и *системы отсчета*.

Приложение 3. Ковариантность уравнений электродинамики

Рассуждения вокруг специальной теории относительности не обходятся без упоминания ковариантности уравнений Максвелла относительно преобразований Лоренца, и не ковариантности относительно преобразований Галилея. Не все представляют себе конкретно, в чем там дело.

Ковариантность легко доказывается на основе 4-мерного формализма. Здесь я покажу, каким путем рассуждали основоположники СТО – Лоренц и Эйнштейн. Текст адресован тем, кто хорошо владеет математическим анализом.

Формулы преобразований Лоренца для координат держим перед глазами:

$$x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right).$$

Для краткости использовано общепринятое обозначение: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Ради простоты разберем ситуацию, когда отсутствуют заряды и токи: $\rho = 0$, $j = 0$. Даже в этом случае выкладки будут громоздкими, я попытаюсь провести их предельно подробно.

Первое уравнение электродинамики

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \text{rot} \mathbf{H}.$$

Используя определение ротора, для координаты x получаем:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}. \quad (1)$$

Выразим уравнение через «штрихованные» координаты, то есть перейдем к движущейся со скоростью v инерциальной системе отсчета (ИСО). Подозреваем, что в новой системе отсчета изменяются не только координаты, но и компоненты полей, но как именно – пока не знаем. Надеемся, что вопрос сам собой решится. Пока сделаем некоторые подготовительные выкладки.

Сначала преобразуем $\frac{\partial E_x}{\partial t}$. Согласно известным правилам обращения с частными производными:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial t'} \frac{\partial t'}{\partial t} + \frac{\partial E_x}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t}.$$

Из формул преобразований Лоренца путем дифференцирования получаем:

$$\frac{\partial t'}{\partial t} = \gamma, \quad \frac{\partial x'}{\partial t} = -\gamma v.$$

Очевидно также, что:

$$\frac{\partial H_z}{\partial y'} = \frac{\partial H_z}{\partial y}, \quad \frac{\partial H_y}{\partial z'} = \frac{\partial H_y}{\partial z}.$$

Теперь уравнение (1) приобретает вид:

$$\frac{\gamma}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t'} = \frac{\partial H_z}{\partial y'} - \frac{\partial H_y}{\partial z'} + \frac{\partial E_x}{\partial x'} \frac{\gamma v}{c}. \quad (1')$$

Оставим его до времени в покое.

Второе уравнение электродинамики

$\text{div} \mathbf{E} = 0$ (напоминаю: для пустого пространства).

То же через проекции вектора:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Перейдем к «штрихованным» координатам. Займемся членом $\frac{\partial E_x}{\partial x}$ (с остальными все тривиально). Итак:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\partial E_x}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x} + \frac{\partial E_x}{\partial t'} \frac{\partial t'}{\partial x}.$$

Снова обращаемся к формулам Лоренца:

$$\frac{\partial x'}{\partial x} = \gamma, \quad \frac{\partial t'}{\partial x} = -\frac{\gamma v}{c^2}.$$

Тогда:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \gamma \frac{\partial E_x}{\partial x'} - \frac{\partial E_x}{\partial t'} \frac{\gamma v}{c^2}.$$

Осталось подставить это в (2), и заодно учесть, что:

$$\frac{\partial E_y}{\partial y} = \frac{\partial E_y}{\partial y'}, \quad \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\partial E_z}{\partial z'}.$$

Тогда получаем (переносим члены):

$$\gamma \frac{\partial E_x}{\partial x'} = \frac{\gamma v}{c^2} \frac{\partial E_x}{\partial t'} - \frac{\partial E_y}{\partial y'} - \frac{\partial E_z}{\partial z'}. \quad (2')$$

Умножим (2') на $\frac{v}{c}$ (вскоре будет ясно, для чего):

$$\frac{\gamma v}{c} \frac{\partial E_x}{\partial x'} = \frac{\gamma v^2}{c^3} \frac{\partial E_x}{\partial t'} - \frac{v}{c} \frac{\partial E_y}{\partial y'} - \frac{v}{c} \frac{\partial E_z}{\partial z'}. \quad (2'')$$

А теперь вернемся к уравнению (1'), заметив, что в нем также фигурирует $\frac{\gamma v}{c} \frac{\partial E_x}{\partial x'}$.

Подставим туда из (2''):

$$\frac{\gamma}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t'} = \frac{\partial H_z}{\partial y'} - \frac{\partial H_y}{\partial z'} + \frac{\gamma^2}{c^3} \frac{\partial E_x}{\partial t'} - \frac{v}{c} \frac{\partial E_y}{\partial y'} - \frac{v}{c} \frac{\partial E_z}{\partial z'}.$$

Сделаем перегруппировку:

$$\frac{\gamma}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t'} - \frac{\gamma^2}{c^3} \frac{\partial E_x}{\partial t'} = \frac{\partial H_z}{\partial y'} - \frac{\partial H_y}{\partial z'} - \frac{v}{c} \frac{\partial E_y}{\partial y'} - \frac{v}{c} \frac{\partial E_z}{\partial z'}.$$

Еще немного преобразований:

$$\frac{\gamma}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \frac{\partial E_x}{\partial t'} = \frac{\partial H_z}{\partial y'} - \frac{\partial H_y}{\partial z'} - \frac{v}{c} \frac{\partial E_y}{\partial y'} - \frac{v}{c} \frac{\partial E_z}{\partial z'}.$$

Осталось сообразить, что $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \frac{1}{\gamma^2}$, и приходим к окончательному уравнению:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t'} = \frac{\partial}{\partial y'} \gamma \left(H_z - \frac{v}{c} E_y \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \gamma \left(H_y + \frac{v}{c} E_z \right). \quad (3)$$

Введем обозначения:

$$E_x' = E_x, \quad H_z' = \gamma \left(H_z - \frac{v}{c} E_y \right), \quad H_y' = \gamma \left(H_y + \frac{v}{c} E_z \right). \quad (4)$$

Тогда (3) совпадет с (1) с точностью до штрихов, а (4) будут искомыми формулами пересчета полей в другую систему координат. Их можно дополнить тройкой формул, получаемых аналогичным образом из уравнений для других координат (вывод опустим):

$$H_x' = H_x, \quad E_y' = \gamma \left(E_y - \frac{v}{c} H_z \right), \quad E_z' = \gamma \left(E_z + \frac{v}{c} H_y \right).$$

Преобразования Галилея

Доказательство ковариантности завершено? Пока еще нет. Попробуем вместо преобразований Лоренца применить преобразования Галилея:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

Аналогично предыдущему (но гораздо проще) можно получить:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial t'} - v \frac{\partial E_x}{\partial x'},$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\partial E_x}{\partial x'},$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t'} = \frac{\partial H_z}{\partial y'} - \frac{\partial H_y}{\partial z'} - \frac{v}{c} \left(\frac{\partial E_y}{\partial y'} + \frac{\partial E_z}{\partial z'} \right).$$

Или, окончательно:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t'} = \frac{\partial}{\partial y'} \left(H_z - \frac{v}{c} E_y \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \left(H_y + \frac{v}{c} E_z \right).$$

Достаточно ввести обозначения:

$$E_x' = E_x, \quad H_z' = H_z - \frac{v}{c} E_y, \quad H_y' = H_y + \frac{v}{c} E_z,$$

– и мы опять пришли к формуле (1). Только преобразования полей несколько другие – без множителя Лоренца. Собственно говоря, формулы преобразования можно было получить, попросту пренебрегая $\frac{v^2}{c^2}$.

Дополним их остальными формулами, вывести которые столь же просто:

$$H_x' = H_x, \quad E_y' = E_y - \frac{v}{c} H_z, \quad E_z' = E_z + \frac{v}{c} H_y.$$

Делаем выводы

Теперь, используя полученные преобразования, попробуем вернуться назад к исходной ИСО, произведя обратное преобразование, к примеру, для H_z (надо будет вместо v брать $-v$).

$$H_z'' = H_z' + \frac{v}{c} E_y' = H_z - \frac{v}{c} E_y + \frac{v}{c} \left(E_y - \frac{v}{c} H_z \right) = H_z \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right).$$

Произведя последовательно прямое и обратное преобразование, мы должны были получить H_z . Но не получили... Преобразования Галилея в электродинамике некорректны!

Попробуем то же, но с формулами, выведенными из преобразования Лоренца:

$$H_z'' = \gamma \left(H_z' + \frac{v}{c} E_y' \right) = \gamma \left[\gamma \left(H_z - \frac{v}{c} E_y \right) + \frac{\gamma v}{c} \left(E_y - \frac{v}{c} H_z \right) \right] = \gamma^2 H_z \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = H_z.$$

Преобразования обращаются, как и должно быть. Вот теперь доказательство завершено: электродинамика ковариантна по отношению к преобразованиям Лоренца.