

Сергей Гаврилов

FAQ 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
Является ли Эйнштейн автором теории?	4
Что такое пространство и время?	5
Что такое система отсчета?	6
Что означает равноправие систем отсчета?	7
Постулируется ли постоянство скорости света?	9
А нужны ли физике постулаты?	10
В чем проблема синхронизации часов?	12
Как работает относительность одновременности?	14
Почему уверены, что эфир не существует?	15
Так что же искал Майкельсон?	17
Что такое события?	18
Понимаем ли мы преобразования Лоренца?	19
В чем смысл релятивистского интервала?	20
Зачем нам четырехмерное пространство-время?	22
Что такое общая теория относительности?	24

Существует ли замедление времени?.....	25
Какая сила сокращает длину?.....	27
Как себя ведет свет?.....	29
Складывает ли скорости сложение скоростей?	30
Существует ли сверхсветовое движение?.....	31
Так что там с близнецами?	32
Замедляется ли время мюонов?.....	34
Как объяснить опыт Физо?.....	35
Аберрация света – эффект абсолютного движения?	36
Эффект Доплера опровергает СТО?	39
Сверхсветовое движение джетов?.....	40
Обнаруживается ли эфир интерферометром Саньяка?	40
Откуда берется релятивистская динамика?	41
Растет ли масса с увеличением скорости?	43
Превращается ли масса в энергию?	45
Как связана «формула Эйнштейна» с СТО?.....	47
Какое отношение имеет теория относительности к квантам?	48
Зачем делают ускорители на встречных пучках?.....	49
Что за «электродинамика движущихся тел»?.....	50
Магнитное поле – релятивистский эффект?	52
Какова все-таки скорость гравитации?	52
Что читать?.....	53
Приложение 1. Решаем задачу на СТО	54
Приложение 2. Пространство и время	57

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 – это математические следствия, выводимые из некоторых соглашений о координатах. Соглашения могут быть иными, координаты – другими. Например, такими, в которых длины движущихся отрезков сокращаться не будут (зато появятся другие странности).

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 законов 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 внятному толкованию опыты с распространением света в движущихся средах;
- 5) обнаружение факта, что взаимодействия распространяются не мгновенно, сделало ньютонову механику противоречивой, парадоксальной.

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

Это дефект популярных книжек.

А все-таки: Эйнштейн ведь просто вывел свою теорию из постулатов?

Такое представление распространено, но ошибочно.

Эйнштейну было хорошо известно, что преобразования Лоренца в электродинамике работают. 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 общефизическое 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 относительно?

Это анекдотическое представление.

Хотя, в самом деле, многие физические величины зависят от принятой системы координат. Относительны пространственные координаты точки. Скорость вряд ли можно считать свойством данного тела, скорее, она характеризует выбранную систему отсчета.

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

Выходит, теория относительности просто 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 подходит 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 сделается 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 известный том Ландау и Лифшица назван «Теория поля». А основа такой теории – специальная теория относительности, с нее и начинается книга.

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.

Является ли Эйнштейн автором теории?

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

Главное ведь не в формулах, а в физической сути. Эйнштейн понял, что ее 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 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!) А Эйнштейн получил преобразо-

вания координат из некоторых предпосылок. И 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?

Можно догадываться, что Эйнштейн торопился застолбить приоритет. Совершенно очевидно, что Пуанкаре был уже близок к тому, чтобы выступить с аналогичной теорией. Именно спешкой объясняется несколько странный вид 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 базируется как раз на опытах. Она и была призвана объяснить эксперименты, которые ставили в тупик. Таким образом, какого-то «возврата к классике» не может быть изначально.

Получается, теория относительности доказана?

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

Разумеется, могут появиться данные, которые потребуют уточнения теории. Кстати, *общая теория относительности* уже является подобным уточнением.

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

Здесь недоразумение. Мысленные эксперименты это просто наглядный способ логических рассуждений, условие задачи, подлежащей рассмотрению. Подобным способом доказательств пользовался еще Галилей. 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 имеются. 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.

Бывает какое-нибудь еще время?

Да, в физике говорят о *координатном времени*, своеобразной временной разметке. Об этом поговорим дальше, а для особо любопытных написано Приложение 2. Главным в СТО как раз является несовпадение собственного времени с координатным.

А разве пространство 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.

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 синхронизированы 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.

В аксиоматике СТО рассматриваются *инерциальные системы отсчета* (ИСО).

Знаю: движущиеся равномерно и прямолинейно?

Что? Нет, это абсурд. Ведь 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 такие скорости, при которых данные законы применимы.

Замечательно, что любые две ИСО движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, так, что если мы знаем одну, то знаем все.

Система координат – то же самое, что система отсчета?

Да – в 4-мерном пространстве-времени. А так обычно под системой координат понимают только пространственные оси (без часов).

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

Любая физическая теория утверждает то же. 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 перехода в иную систему 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 возникло 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?

Любую задачу можно решить в любой системе отсчета. Что 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.

Есть две взаимно движущиеся системы отсчета. Какая из них «неподвижна»?

Ту, часы которой мы принимаем за синхронные.

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

Конечно, не бывает: система отсчета – 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 которой 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.

Комично, 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.

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 любых инерциальных систем отсчета действуют одни и те же законы (уравнения, описывающие движение).

Именно в этом смысле все ИСО равноправны.

Понятно.

Думаю, что не до конца. Проблемы с законами электродинамики будоражили физиков на протяжении полувека. В самом деле: к какой лаборатории относятся уравнения Максвелла? Вопрос не праздный: Земля вращается вокруг оси, и еще вокруг Солнца. Если уравнения действительны сейчас, то, возможно, через 12 часов это будет совсем не так?

В обычной механике 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.

Закон Ньютона $F = ma$ точно не меняется при преобразованиях Галилея – они не изменяют ускорений. А вот с уравнениями для поля (уравнениями Максвелла) ничего подобного не получается! Вылезает неувязка, напрашиваются поправки.

Но, может, так и должно быть?

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

Лоренцу 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?

Вы ошибаетесь, релятивистские явления можно наблюдать прямо на лабораторном столе.

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. Наблюдаемое явление не изменится: рамка, как и прежде, будет поворачиваться. 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. Перейдем в другую 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.

Значит, 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.

Уже третий вариант формулировки? И снова 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 равна c , но это следует из волнового уравнения электродинамики.

Если хотите, вот вам четвертый вариант 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.

Давайте вернемся к скорости света. Никто еще не измерял ее в одну сторону – «однаправленную», не так ли?

Это неверно. «Однаправленную» скорость света, конечно, нельзя измерить без некоторой договоренности о синхронизации часов. Но без нее не определена вообще никакая скорость. Первое измерение скорости света в XVII веке Рёмером было произведено как раз «однаправленным» 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 человечек! 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 измерять путь и время, пользуясь линейками и часами любой (но одной и той же!) 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».

А 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. 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?

Дело в том, что два принципа Эйнштейна представлялись противоречащими друг другу. Если скорость света не зависит от скорости источника, значит, она зависит от среды распространения – «эфира». 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 некоторого 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. 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 какое-то фундаментальное значение. Как мы говорили, 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. Или инвариантность интервала. Что и 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 синхронизации часов. Добавка к постулатам?

Нет, дидактический ход, уточнение ситуации. Потому что вопрос синхронизации часов в дорелятивистской кинематике оставался традиционно за кадром. Хотя существовал и там!

Физика нуждается в задании координат – пространственных и временных. Так, рассмотрение механического движения использует понятие скорости. Для введения скорости требуется, по меньшей мере, пара пространственно разнесенных 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?

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.

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

Почему в обычной механике не говорят о проблемах с часами?

По Ньютону подразумевалось «абсолютное» время, которое может быть востребовано в любой момент в любой точке. Что соответствует сигналам, распространяющимся мгновенно. Принципиально – с их помощью можно непротиворечиво синхронизировать все мировые часы.

Существование подобных «мгновенных» взаимодействий предполагалось господствовавшей когда-то концепцией *дальнодействия*. Принималось, что взаимодействие тел на расстоянии (например, тяготение) происходит так же, как и контактное: без задержки.

А откуда это взяли? Почему было не предположить задержку? Мы сейчас знаем, что оно так и есть.

Верно, сейчас говорят о *близкодействии*: взаимодействие на расстоянии обусловлено некоторым материальным агентом (хотя и не механическим). Поэтому требует ненулевого времени. Мы такой агент называем *полем*.

Из-за того, что не существует мгновенных взаимодействий, нельзя определить одновременность?

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

Определение системы отсчета непременно включает и синхронизацию часов, что в прежней физике особо не подчеркивалось. А ведь СТО ничего нового в понятие системы отсчета не вносит!

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

Он вовсе необязателен. Корректная синхронизация часов основана на принципах однородности и изотропности пространства в ИСО.

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, например, закон сохранения импульса.

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

Читая пионерские работы, надо помнить, что их авторы, воспитанные на другой физике, адресовались такой же аудитории. Взгляды, сейчас представляющиеся естественными, не сразу были как следует осознаны.

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.

При таком способе – скорость света получится, разумеется, постоянной! Хитрость Эйнштейна?

Наоборот: из инвариантности скорости света следует допустимость такого способа.

В сущности, он следует из общезначимого *принципа причинности*.

Что за принцип?

Принцип состоит в том, что причина всегда опережает по времени следствие. Посему, если два события, происшедшие в двух разных точках (разноместные), могут быть связаны причинно-следственной связью, их нельзя считать одновременными.

Что значит – «могут быть связаны»?

Значит, сигнал от события A успеет дойти к точке события B . Или наоборот.

Допустим, что это не так (не успеет). Тогда говорят, что A и B *квазиодновременны*, не могут быть причинно связаны. 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.

Ага, все-таки, есть элемент условности, соглашения?

Да, однако естественно наложить условие, что если A одновременно с B , то и B одновременно с A .

Разумеется, а как же иначе?

Вот видите! Это и означает – *непротиворечиво* синхронизировать часы. На языке математики, одновременность является *отношением эквивалентности*, которое должно удовлетворять требованию *рефлексивности*. А такое выполнится только при синхронизации по Эйнштейну, когда обеспечена симметрия.

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: перемещение часов ни на что не влияет. В действительности, разные часы, перемещаемые из точки A в точку B различными способами, разойдутся в показаниях – проверено опытом.

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

Как работает относительность одновременности?

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

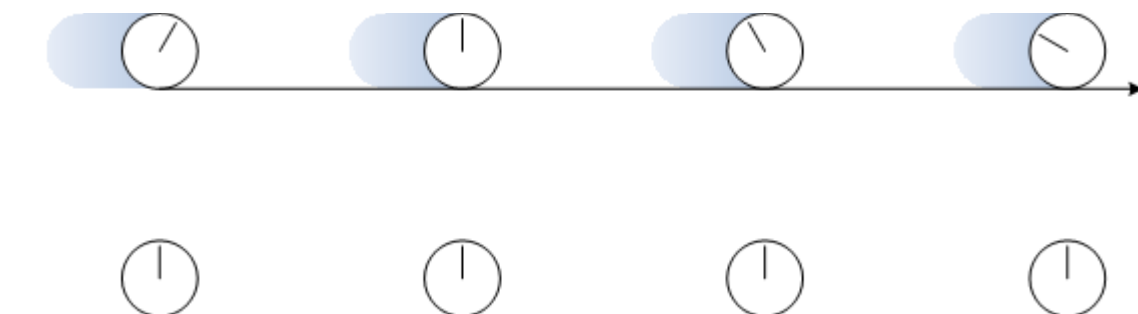
Нас же не удивляет, что в разных системах отсчета скорость конкретного тела не одинакова. Или что не абсолютен пройденный им путь. Просто это более привычно, чем время: в повседневной жизни относительность времени не проявляется.

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?

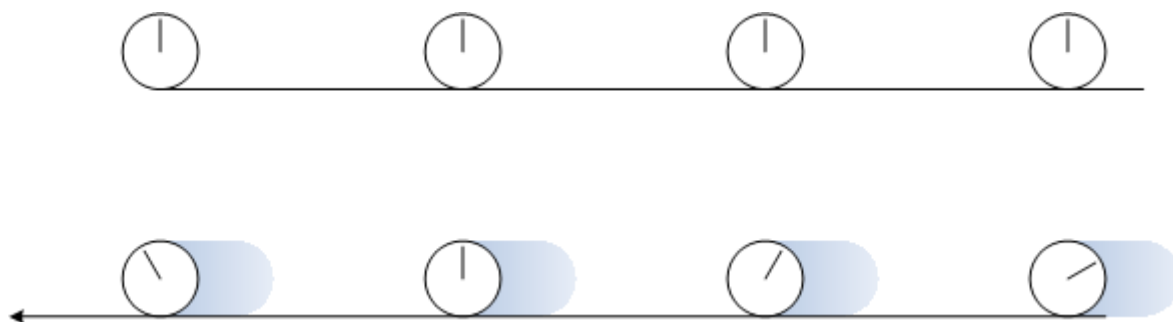
Это ошибочное представление. Всегда имеется в виду сравнение показаний часов, находящихся строго рядом. А куда, какому «наблюдателю», и каким способом будет доставлено сообщение о результате, на содержание сообщения уж конечно не повлияет.

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».



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

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.

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 представляют). Идея эфира в физике тесно связана с *волновым уравнением*, которым описывается любое волновое движение: например, акустические волны, и электромагнитные также.

Волновое уравнение $\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} = 0$ 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 какой-то одной лаборатории. 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 эфире.

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 системах отсчета (преобразования Лоренца).

В специальной теории относительности, базирующейся на преобразованиях Лоренца, 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 на воде 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.

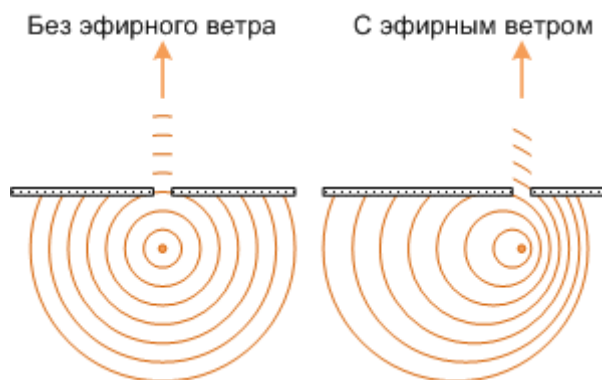
Так что же искал Майкельсон?

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

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 $\frac{v^2}{c^2}$. Он лежал вне точности приборов XIX века.

Луч должен же сноситься поперечным эфирным ветром. От орбитальной скорости Земли отклонение на плече 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 света в каждой точке – векторная сумма его 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 эту дыру.

Установка Майкельсона могла уже 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. А при дистанционном распространении взаимодействий оно, 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 вполне обнаружимо во втором порядке величины $\frac{v}{c}$. Можно измерять 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 иначе: измерять 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 если считать, что Земля увлекает с собой эфир всей Вселенной...

Отрицательный результат окончательно похоронил все теории эфира, кроме теории 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. Например: поле скоростей, поле температур, – здесь естественными были вопросы: скорость – чего? температура – чего?

Когда стало очевидным, что поле (электромагнитное, гравитационное) 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 первенству. Его результаты суть факт истории, а не современной науки.

Что такое события?

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

Потому, что базой СТО являются преобразования координат.

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 – вот почему принято за базовое понятие. Если выбрана система отсчета, событие характеризуется четырьмя числами: x, y, z, t .

Событие – факт физически абсолютный, *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?

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. Преобразования Лоренца касаются событий.

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

Движущихся друг относительно друга?

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

Они отвечают на простой вопрос: если известны координаты события в некоторой системе отсчета – каковы его координаты, замеренные 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.

В формуле для времени смущает второй член в числителе. Даже при малых скоростях – 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 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 формулы преобразований неверны!

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, и минусы.

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 *пространственно-подобным* (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 се-

кунду 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 событиями, 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 если интервал равен нулю?

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

Почему время является мнимой величиной?

Нет, не является. Догадываюсь, что вы нечто подобное 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» с его метрикой $\sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2}$ – 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» вектора. Им является четырехмерный *радиус-вектор события*, получаемый дополнением пространственного радиус-вектора \mathbf{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 мощностъ, развиваемая при совершении силой работы. Таким образом, и компоненты силы при переходе к другой ИСО не остаются неизменными!

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

И должны быть предметом отдельного изучения. 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. Откуда оно берется, непонятно. 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, как же вы 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 рассматривается вне полей тяготения? Я про это читал.

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. При выводе преобразований 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 продолжаться?

Вся возня с преобразованиями Лоренца должна иметь скорее локальный смысл.

Вы 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. Хотя есть и еще одна причина, но мы о ней умолчим.

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.

Материя? По-моему, это скорее философская категория...

В физике материя есть там, где не равен нулю *тензор энергии-импульса*.

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?

У вас две ошибки.

Во-первых, величина поля ни при чем. Замедление местного времени связано с низким *гравитационным потенциалом*.

Во-вторых, связь тут обратная: гравитационный потенциал сам является некоторым выражением кривизны пространства-времени, в данном случае замедления времени.

Яблоко Ньютона, оказываясь в точках с все более медленным ходом 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.

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) 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 движется частица. Это будет *координатное время*.

Начало промежутка времени t_1 фиксируем по часам A , против которых находятся движущиеся часы. Конец t_2 – по часам B , находящимся в точке, где теперь оказались часы (но синхронным с первыми часами). 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!

Говорить о том, что одни часы идут быстрее или медленнее других – бессмысленно, и СТО такого ничуть не утверждает. Невозможно прямое сравнение хода пары часов, потому что их нельзя постоянно совместить. 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. Если проводить такое сравнение, то окажется, что первые часы все больше отстают, как было сказано.

Выводы:

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 мы выбрали конкретную ИСО, движение (и «замедление времени») становится, так сказать, абсолютным.

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, следовательно, движутся. Она больше: движущиеся 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 мы ускоряем 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 мы 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 системах отсчета. С собственно стержнем ничего не происходит, разумеется. Недопонимание может быть вызвано двусмысленным 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.

Хотя можно говорить и о сокращении длины ускоренного тела, но лишь после того, как действие сил закончится, и все динамические деформации снимутся.

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. Если вообразить сложное уравнение, определяющее размеры стержня, то в результате преобразования к новой ИСО оно 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 придти 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. Так что 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.

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. Мы нашли способ обнаружить эфир?

Фронт световой волны останется сферическим в любой системе отсчета. Повторяю, релятивистское сжатие справедливо лишь для фиксированных отрезков, попросту – «твердых тел». 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.

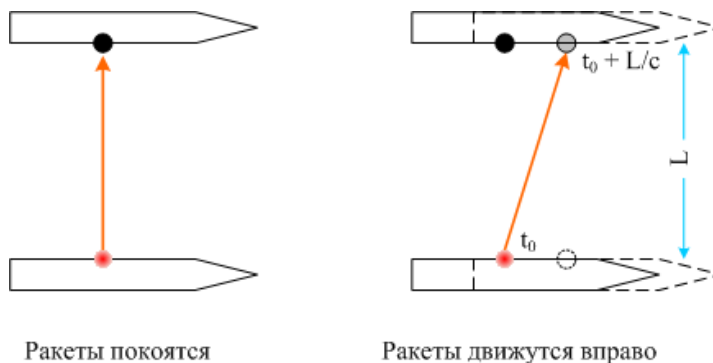
Вопрос некорректен, никакая система отсчета не может двигаться со скоростью света. Не забывайте, что v в формулах Лоренца – относительная скорость систем отсчета!

Но фотон же движется?

Фотон не имеет массы, 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: а иначе, пока свет преодолевает отрезок между ракетами, мишень улетит 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 же мимо мишени лишь только потому, что мы наблюдаем происходящее из другой системы отсчета?

Разве движение света может зависеть от движения источника (как движение пули)?

Скорость (а 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.

Парадоксы СТО?

Ничуть, простая кинематика. Вы согласились, что пуля полетит по наклоненной траектории. Этому ничуть не мешает 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 луча повернуто туда же – по курсу полета. Подобным образом отклоняют радиолуч в фазированной антенной решетке.

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.

А разве не надо использовать формулу релятивистского сложения скоростей?

Не надо. Данный вопрос мы сейчас разберем.

Складывает ли скорости сложение скоростей?

Существует формула релятивистского сложения скоростей. Согласно ей $c + v = c$?

Чепуха, СТО ведь не опровергает арифметику.

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 в другую систему 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»?

Вы забыли, что в ИСО тела надо использовать 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, поскольку, 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:

$$v' = \frac{u + v}{1 + uv/c^2}.$$

Заметьте: v и u это вовсе не скорости двух объектов.

Странно, а что же они тогда?

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

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

Так что применение этой формулы для $v = u = c$ бессмысленно: системы отсчета не могут взаимно перемещаться со скоростью света.

Все же странно: как векторы скорости могут складываться не по правилам сложения векторов?

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

В старой 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 $v' = \frac{u+v}{1+uv/c^2}$ следует, что если $v=c$, то $v' = \frac{u+c}{1+u/c} = c$: 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, лезвий ножниц (когда они почти параллельны).

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

Тогда вопрос: 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 (тут мы говорим о физических следствиях, которые – хотя бы в принципе – можно проверить прямым опытом).

Парадоксом 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. Даже просто остановившись на финише, ракета уже сменит сопутствующую ИСО.

Теперь она неподвижна в ИСО Земли, зафиксировав 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 сопутствующей инерциальной системы отсчета. В этом и состоит неравноправие близнецов.

Вы ловким трюком исключили ускорения, а если все-таки их 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 перехода между системами отсчета изменяются временные координаты событий. Если мы, после разворота путешественника, пожелаем 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 часов. На сами 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. Никакого ловкого трюка (на что претендуют составители якобы «неудобных» примеров) здесь нет.

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» 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, сократится – в той же мере. Результат получается точно тем же самым, а ничего не наоборот.

Отсюда видно, кстати, что релятивистское сокращение длин и замедление времени это не два различных явления, а две стороны одного и того же – преобразований Лоренца. Иначе говоря – поворота координатных осей в пространстве-времени.

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?

Потому что 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. Вспомните: по Френелю эфир увлекается в степени, зависящей от коэффициента преломления среды n . Но для разных длин волн этот 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.

Как же это 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 теперь в другую ИСО – в которой среда движется со скоростью v , для определенности – 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 $c_1 < c$ неинвариантна, 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 не в направлении движения среды, а против – 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 преобразованиям Галилея, она и является скоростью света в СО среды. Получили формулу «частичного увлечения» Френеля! Как видим, она 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?

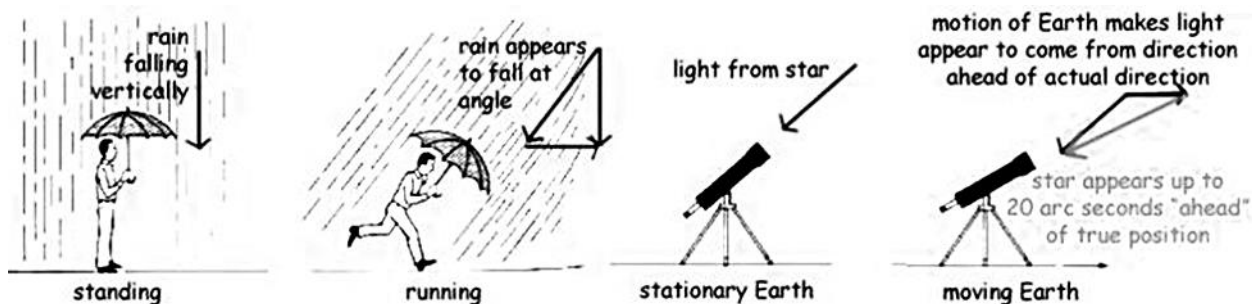
В статье Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» есть параграф, посвященный теории абберации. Как вы считаете, возможен ли был бы анализ абберации с точки зрения СТО, будь это явление несовместимым с теорией?

Аргумент понятен. Но нельзя ли убедиться предметно?

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

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

Да, таким манером часто 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...

Скорее, 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 ИСО, которая не лучше и не хуже прежней.

Можно утверждать, что абберация противоречит постоянству скорости света?

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

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

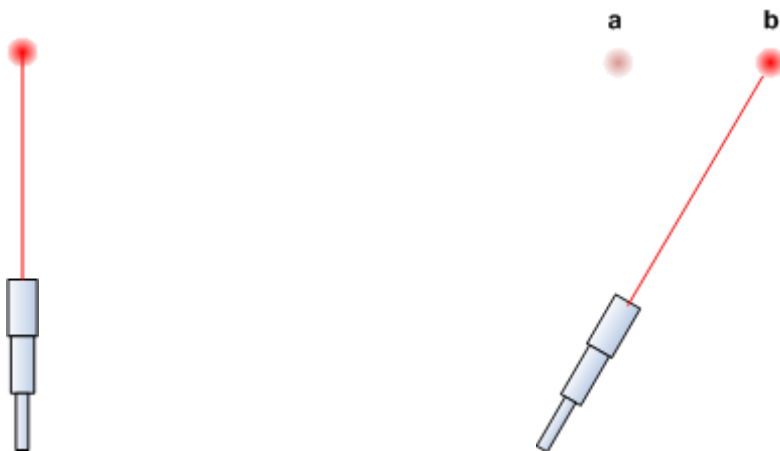
Сомневаюсь: пока свет от нее шел, она, возможно, вообще погасла – ведь прошел миллион лет!

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...

Понимаю: 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 «здоровый смысл» противится! В чем и состоит трудность понимания абберации.



Наблюдатель, неподвижный относительно звезды, видит ее на направлении ее нынешнего положения

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 круговой орбите, а всегда строго прямолинейно – можно ли было бы зафиксировать звездную абберацию?

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

Выходит, причина абберации 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. Абберация 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 абберация 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 забегает 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 получаются 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, например, растёт, то должно все больше заполняться волнами, которые из источника вышли, 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 джет. Зная расстояние, умножением на него 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 (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.

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 – Геля 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 корпускулы 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!

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 получаться 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: никто ведь не приписывает ее «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:

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

Почему же 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. Тем более что с ее кинематикой мы уже познакомились.

А вот электродинамика в свете СТО ничуть не меняется, наоборот, избавляется от проблем, которые усматривались ранее (что будет у нас отдельной темой). Положение: уравнения Максвелла верны в любой ИСО – даже можно принять за постулат теории.

Откуда вообще выводится релятивистская динамика?

Является следствием тех же самых преобразований Лоренца.

Но из преобразований Галилея не следуют же законы Ньютона?

Мы строим не на пустом месте. Законы Ньютона по-прежнему должны быть верны 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 и получаются выражения для релятивистского импульса и энергии).

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 мы пришли бы к нарушению 3-го закона Ньютона, а значит, и 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-школьному, 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: $p = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = mv\gamma$. Здесь подобных парадоксов нет. Ну а для малых скоростей имеем знакомое 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 $m = p/v$. Это 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, к чему в формуле $p = m \frac{v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ второй множитель, 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 терминов?

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».

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

Это верно лишь применительно к одиночной частице. В случае сложной системы (состоящей из нескольких частиц, полей) возникнут трудности с тем, что считать массой покоя. Она ведь не является суммой масс покоя частиц, ну а для полей и волн понятие покоя вообще бессмысленно.

Современное же 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, существуют 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.

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, 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.

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 тривиальность: релятивистская масса – просто другое название энергии.

Сейчас физика оперирует фундаментальным уравнением динамики:

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

Для массивного тела $\mathcal{E} = mc^2$ – 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 есть 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: $p = \frac{v\mathcal{E}}{c^2}$.

Вот 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.

Ну а 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!) переходит к частицам, испускаемым при делении, в том числе квантам электромагнитной энергии. Соответственно, ядра, 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 системы.

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 $\mathcal{E}_0 = mc^2$? 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.

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

Как может быть иначе?

Тем не менее, здесь некоторая договоренность, хотя и логичная. К тому же 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.

Смотрите: если временно забыть про энергию покоя, можно будет указать систему отсчета, в которой энергия тела нулевая.

Та, в которой тело покоится?

Естественно, поскольку от энергии осталась кинетическая.

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

Чтобы достичь единства, пришлось изменить нормировку энергии в механике.

Энергия частиц 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 мы сейчас 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 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, как видим, хорошо легло в теорию.

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

Какое отношение имеет теория относительности к квантам?

Мы 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 избрать. 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 или 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*:

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

В теоретической физике частота часто 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 еще закон сохранения импульса.

Рассмотрим школьную задачу. Разогнанное до скорости ν тело врезается в равное по массе покоящееся, общий импульс сохраняется. Скорость центра масс «продуктов взаимодействия» равна $\nu/2$, и значит, как минимум, половина начальной энергии будет без пользы унесено 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 – это 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.

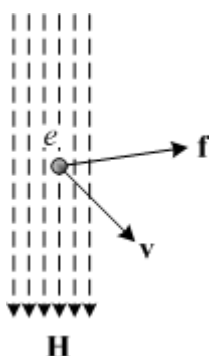
Знаю: сила Лоренца?

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

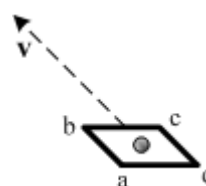
Проблема возникает при переходе в систему отсчета, в которой заряд неподвижен. Сила Лоренца вроде бы равна нулю, но она же не исчезнет от того, что наблюдатель начал двигаться!

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.

Включим 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. Разве 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. Нередко 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. 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. 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 (и преобразований Лоренца) мы в следующем разделе 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.

Выходит, что все-таки магнитное поле существует объективно.

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 (считая, 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?

Молчаливо предполагают, что поле движущегося тела будет таким же, как у неподвижного, что совсем не так.

Применительно к электродинамике правильный результат впервые получили Лиенар и Вихерт – еще до Эйнштейна. И оказывается, что этим устраняется кажущаяся несимметрия поля. А формулы приводят к преобразованиям Лоренца!

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 и к гравитационному потенциалу.

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. Так 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:

Макс Борн. Эйнштейновская теория относительности.

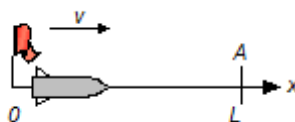
Приложение 1. Решаем задачу на СТО

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.

Находимся в ИСО-1

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

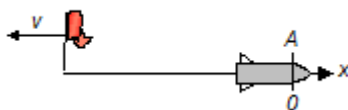
Пока что мы находились в ИСО-1 старта. Задача состоит в том, чтобы рассмотреть ситуацию с точки зрения путешественника.

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).

Переходим в ИСО-2

Перешли в сопутствующую систему отсчета корабля. Теперь мы сами неподвижны, а точка старта удаляется в противоположном направлении со скоростью v (новый рисунок).



ИСО-2: корабль неподвижен, старт удаляется влево со скоростью v

Системы отсчета ИСО-1 и ИСО-2 имеют общее начало – событие старта. Так что координаты этого события в ИСО-2 те же самые: $x_0' = 0$, $t_0' = 0$.

Пространственная координата события разворота в новой ИСО $x_a' = 0$ (корабль неподвижно находится в начале координат). А вот его временную координату надо пересчитать из ИСО-1 в ИСО-2, пользуясь формулой преобразований Лоренца для времени:

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

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.

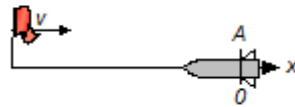
Кстати, в ИСО-2 отрезок пути движется навстречу кораблю со скоростью v . Он проскакивает мимо от момента $t_0' = 0$ до $t_a' = \frac{L}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Несложно определить длину отрезка от точки старта до точки A :

$$L' = v(t_a' - t_0') = L \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Сюрприз номер два: получили формулу «сокращения длины»!

Принимаем ИСО-3

Разворот корабля совершился (см. рисунок): мы находимся в той же самой точке A , имея скорость (в ИСО-1), равную теперь $(-v)$. Тем самым, мы сменили сопутствующую ИСО-2 на новую, назовем ее ИСО-3.



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.

$$x_a'' = \frac{x_a - (-v t_a)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{L + v \frac{L}{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$t_a'' = \frac{\frac{L}{v} - \frac{-v}{c^2} L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{L}{v} \cdot \frac{1 + v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Так? Нет, выкладки ошибочны. Неувязка: $x_a'' \neq x_a'$ и $t_a'' \neq t_a'$. Хотя вроде бы относятся к одному и тому же событию в сопутствующей ИСО. Почему?

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 состыкуются. 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 после разворота корабля сделалось отрицательным! При смене сопутствующей ИСО старт произошел «раньше», текущее время старта как бы прокрутилось 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 это 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

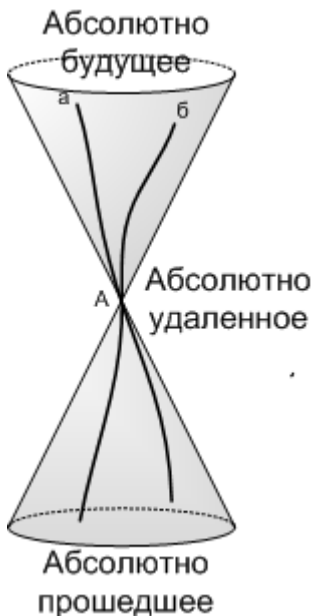
Каждое конкретное значение собственного времени частицы назовем *событием*, совокупность всех таких событий образует существование («жизнь») частицы.

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 . Данное событие назовем *встречей* 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 бу-

дущим, 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

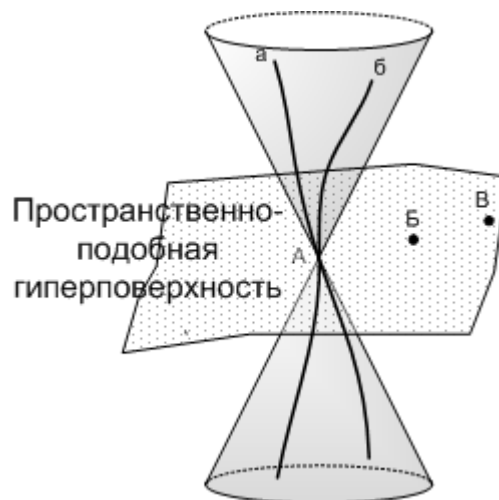
Повторим: никакое событие B , лежащее в области абсолютно удаленного по отношению к A , не может состоять с A в причинно-следственной связи. Говорят, что A и B *квазиодновременны*. «Квази» – потому что двум событиям B и B' , «одновременным» с A , ничто не запрещает быть между собой причиной и следствием.

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.

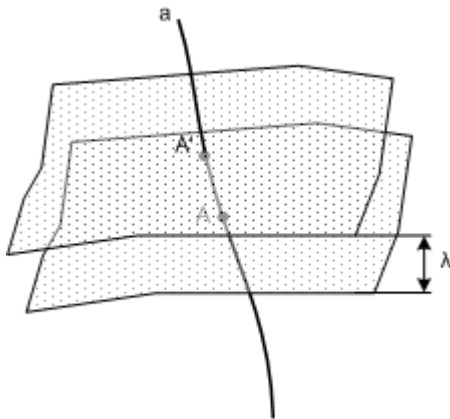
Потому выделим в этой области (в подпространстве II) подпространство, включающее и A , обладающее следующим свойством. Никакая пара точек (событий) из этого подпространства не может являться друг для друга причиной и следствием. Теперь мы уже вправе говорить, что все эти события *одновременны*.

Назовем такую область *пространственноподобной гиперповерхностью* – см. рисунок. Она обладает важным свойством: любая мировая линия пересекает эту гиперповерхность в единственной точке (что очевидно из определения).

Через произвольную точку A , по видимому, возможно провести множество пространственноподобных гиперповерхностей, лежащих внутри II. Для определенности примем какой-то частный класс ги-



перповерхностей. 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 пространственноподобной гиперповерхности.

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 a , 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 $\Delta\lambda$. Однако, 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*.