

Сергей Гаврилов

FAQ по специальной теории относительности

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

Но по дискуссиям на интернет-форумах видно, что логика СТО понимается плохо. Отсюда путаница, ложные «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 разобрать не получается. Не получается даже понять готовое решение! Зато уверенно критикуют – не саму СТО, а собственное ошибочное представление.

Здесь я попытался дать ответы на наиболее частые вопросы, предложить разъяснения типичных ошибок и заблуждений – как правило, с новой, не приевшейся стороны. Текст нельзя рассматривать как введение в теорию: изложение ориентировано на читателя, который СТО уже отчасти «знает». Быть может, он убедится, что раньше не понимал ее по-настоящему.

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...

Физиков-профессионалов прошу отнестись благожелательно: ради доступности что-то приходилось упрощать, кое-где существенно, хотя и сохраняя смысл.

А к прочим читателям просьба: не адресовать мне 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».

Пространство и время	2
Системы отсчета	3
О «покоящихся» и «движущихся» системах отсчета.....	4
1-й постулат: равноправие систем отсчета	5
2-й постулат: инвариантность скорости света	6
О постулатах в физике	8
Синхронизация часов	9
Относительность одновременности.....	10
Синхронизация по Эйнштейну.....	12
Эфир.....	13
Опыт Майкельсона	14
События	16
Преобразования Лоренца	17
Релятивистский интервал.....	19
Четырехмерное пространство-время	21
Замедление времени – 1	22
Замедление времени – 2	23
Сокращение длины	25

Сложение скоростей	26
Парадокс близнецов	28
Длина пробега мюонов.....	30
Свет и фотоны	30
Абберрация света.....	32
Эффект Доплера.....	33
Эффект Саньяка	34
Уточняем закон Ньютона.....	36
Импульс, энергия и масса	37
Формула Эйнштейна	39
СТО и кванты	40
Ускорители частиц	42
Электродинамика.....	42
Запаздывающие потенциалы	44

Пространство и время

Я не понимаю, почему теория Эйнштейна так легко была принята учеными? Дело тут нечисто!

Вы заблуждаетесь, это произошло далеко не сразу. Тем не менее, теория была принята – по многим причинам, я назову лишь некоторые.

1) На рубеже XIX и XX веков обнаружили, что поведение электронов при высоких скоростях отклоняется от законов Ньютона. Релятивистские уравнения, точно совпадающие с данными опытов – одного этого достаточно.

2) С помощью СТО удалось преодолеть кризис механики, связанный с наличием взаимодействий, распространяющихся не мгновенно.

3) СТО дает возможность записать любое фундаментальное уравнение в **инвариантном** виде, то есть, независимо от системы координат. Что кажется глубоко верным: законы природы не могут ведь зависеть от выбранных координат.

Впрочем, эти пункты, наверно, пока мало что вам говорят. Разъяснения впереди.

Мне эта теория кажется сложной, искусственной, а ведь природа проста.

Такое мнение часто слышишь. На самом деле, наоборот, СТО принципиально проста и исходит из естественных принципов. В ней нет ничего надуманного и никаких гипотез. Ее кажущаяся «сложность» проистекает из плохого понимания, и из неготовности к напряженной работе по освоению. Отчасти мешает и «здравый смысл», то есть привычные шаблоны мышления.

Теория относительности оперирует пространством и временем. Но никто еще не дал определений пространства и времени. Это философские вопросы, которые, неизвестно, будут ли когда-нибудь решены.

В физике такие определения имеются. Время – это то, что показывают часы. Пространство – то, что измеряется линейками.

Какие-то детские определения... Не раскрывается глубинная сущность, например, времени.

Напротив, определения предельно конкретны. Хотя несколько огрублены, так что мы продолжим рассмотрение этого сюжета ниже. А вот вопросы «глубинных сущностей» оставим философам.

Хорошо, но, например, 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. Опыт показывает, что есть процессы, которые могут служить эталонами времени. Они имеют различную природу (частота излучения, соответствующая переходу в атоме; обращение планет вокруг Солнца). Мы замечаем: если «эталонные» процессы по возможности освобождать от внешних воздействий, случайных влияний – они будут все в большей степени согласованы между собой.

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?

Это 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.

Системы отсчета

Мне кажется, странности СТО связаны с тем, что Эйнштейн ввел в физику излишнее, субъективное понятие «систем отсчета».

Во-первых, Эйнштейн тут ни при чем. Даже законы Ньютона невозможно корректно сформулировать, не используя понятие о системах отсчета (СО).

Во-вторых, понятие системы отсчета вполне конкретно и объективно. Говоря опять же упрощенно, это совокупность часов и линеек. Принято считать, что они условно «прикреплены» к некоторому **телу отсчета**.

Более строго – система отсчета есть способ назначения событию его координат. Когда мы имеем способ указать координаты точки, это значит, что задано пространство. Данный способ, собственно говоря, и образует пространство. Если мы умеем присваивать событию еще и временную координату, то в совокупности имеем пространство-время. То есть, выбрана система отсчета.

Погодите, разве пространство не существует вокруг нас объективно, как объем, вместителище всего?

Нет, в физике (да и в математике также) пространство это формализация, способ познания. Если мы сядем на карусель, приняв ее за систему отсчета, то обнаружим, что все пространство изменилось, приобретя необычные свойства. У нового пространства будет и другой **метрический тензор**.

В аксиоматике СТО рассматриваются инерциальные системы отсчета (ИСО). Но это не значит, что не-ИСО (например, связанные с той же каруселью) выпадают из сферы СТО! Просто они требуют более изощренного подхода.

И еще: имеется в виду определенная процедура синхронизации разноместных часов – об этом далее. Считается, что часы любой ИСО синхронизированы между собой.

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 относительно, все зависит от выбора системы отсчета...

Наоборот, она настаивает на абсолютности того, что фиксируется инструментально.

Например, показание часов, находящихся в точке, где произошло событие, абсолютно. Любых часов – неважно, движущихся или покоящихся. Это следует просто из принципа причинности.

Каким образом следует?

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 это мгновение и в этой 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.

Больше того: величины, которые в обычной механике зависят от системы отсчета (скорость, пройденный путь и т.д.) – в СТО в некотором смысле абсолютны, инвариантны.

Но что-то же относительно?

Относительность будет там, где участвуют некоторые договоренности, условия. Фундаментальная относительность это относительность одновременности. О ней мы поговорим отдельно.

О «покоящихся» и «движущихся» системах отсчета

В СТО говорят о покоящихся и движущихся системах отсчета. И в то же время утверждают, что все они равноправны. Как же так?

Да, все инерциальные системы отсчета равноправны.

Но ведь из СТО следует явная асимметрия. Известно, что время в движущейся системе отсчета идет медленнее. Выходит, что различие покоящейся и движущейся ИСО налицо?

Никакого различия нет. А ваше утверждение о времени попросту неверно, ведь время это показание часов, а значит, принадлежность конкретной **точки**, а не системы отсчета. Это еще будет разъяснено в должном месте.

Допустим... А все-таки в начале известной статьи Эйнштейна упоминается «неподвижная» система координат. Значит, ИСО все-таки неравноправны? И почему он поставил кавычки?

Начнем с того, что система отсчета всегда неподвижна – просто по определению. Любые движения задаются относительно нее. Потому при решении задач никогда не подчеркивают «неподвижность» СО.

Но, поскольку Эйнштейн ищет преобразование координат при переходе между двумя ИСО, он вынужден указать, какую систему отсчета из двух он рассматривает на данном этапе **как таковую**. На это он указывает словом «неподвижная». При этом другая рассматривается до поры просто как система движущихся тел.

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

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

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

Любую задачу можно решить в любой ИСО. Это даже используют для контроля правильности решения: должен получиться тот же самый результат.

В принципе, можно взять и неинерциальную систему, просто в ней формулы намного сложнее.

1-й постулат: равноправие систем отсчета

Специальная теория относительности базируется на двух постулатах. Кажется, суть первого из них (принципа относительности) состоит в том, что любой процесс протекает одинаково в любой инерциальной системе отсчета.

Это не так. 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».

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

Да, это звучит точнее. Формулируя **принцип относительности**, обычно говорят, что для любых инерциальных систем отсчета действуют одни и те же законы. Говоря коротко, все ИСО равноправны. Только здесь нужны добавочные разъяснения.

К примеру, электромагнитные явления протекают совершенно одинаково, ставить ли опыты в «неподвижной» лаборатории, или в движущейся (в вагоне, например) – факт, многократно и точно проверенный. Они удовлетворяют одним и тем же уравнениям электродинамики **в соответствующих системах отсчета**. Тогда почему же проблемы с законами электродинамики будоражили физиков на протяжении полувека – пока Лоренц и Пуанкаре не предложили некоторое решение, а Эйнштейн не закрыл вопрос окончательно? В чем состояли проблемы?

Вот этого я не понимаю...

Одинаковому протеканию физических явлений в любой «инерциальной» лаборатории должна соответствовать математическая формулировка: уравнения движения, одинаково записываемые в любой ИСО.

Значит, они одинаковы в любой ИСО, в чем проблема?

Проблема в том, что координаты легко пересчитываются из одной ИСО в другую. 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, то должны получиться...

...те же самые уравнения?

Вот именно. Это называется **ковариантностью**. Но получатся ли?

Закон Ньютона $F = ma$ не изменяется при преобразованиях Галилея – факт очевидный: эти преобразования не меняют ускорений. А вот уравнения для поля (Максвелла) представить в ковариантном виде не получалось. Наконец, Лоренцу удалось подобрать

формулы преобразований (вместо галилеевых), которые не изменяли вид уравнений электродинамики.

2-й постулат: инвариантность скорости света

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

Неверно, такого постулата нет.

Ах, да, поправляюсь: 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.

Но, по-моему, это совсем не одна и та же мысль...

Разумеется, здесь просто подключают первый постулат.

Если скорость света не зависит от движения источника, значит, она является фундаментальной константой, законом природы – ведь в пустоте ей не от чего больше зависеть.

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

Вообще-то свет это электродинамика, и то, что он попал в постулаты, обусловлено историческими причинами. Вполне возможно развить релятивистскую механику, если второй постулат принять в таком виде: «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.

Первый постулат говорит о том, что физические законы выглядят одинаково в любой инерциальной системе отсчета. Применительно к законам механики это было известно; новый принцип относительности распространил то же и на законы электродинамики.

А ситуация пулемета и пуля (**баллистическая теория**) отвергается вторым постулатом – независимости скорости от движения источника.

Но ведь и скорость звука не зависит от скорости источника звука. И принцип относительности в механике действует. Что мешает вывести отсюда «теорию относительности» для звука?

То, что звук распространяется не в пустоте. Его скорость зависит также от среды распространения. В уравнения движения будет входить скорость среды в выбранной системе отсчета, а она неодинакова.

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.

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! Вот это и имеется в виду.

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

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

Непонятно, почему постоянство скорости света в любой ИСО постулируется. Разве вопрос не в том, одинакова ли эта скорость на самом деле?

Дело в том, что никакой «скорости на самом деле» не существует.

Как же так? По-моему, скорость движущегося автомобиля вполне определенная.

Да – потому, что она значительно меньше предельной скорости передачи взаимодействий, и можно не задумываться о деталях синхронизации часов. Эти вопросы нас еще ожидают впереди.

Действительно, я слышал, что никто еще не измерял скорость света в одну сторону – «однонаправленную».

Это не совсем верно. Замерить-то несложно, вопрос в интерпретации результата.

Первое измерение скорости света в XVII веке Рёмером было произведено как раз «однонаправленным» методом – на трассе Юпитер-Земля.

Как это удалось?

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.

С нынешней же техникой это вообще элементарно: сверим двое высокоточных атомных часов, поместим в разных точках и измерим время прохождения света.

Если только часы сохраняют свою синхронизацию...

Вот именно! Как только появилось подобное сомнение, мы попадаем в порочный круг: для синхронизации часов опять-таки используется свет.

Дело вовсе не в невозможности измерения скорости света. А в невозможности на основании такого измерения сделать выбор между конкурирующими теориями.

Потому-то и вводится **постулат**, то есть положение, произвольно принимаемое за отправное.

Но как же принимают то, что невозможно проверить?

Обычный метод в науке. Принимают постулат из общих соображений (мы о них еще будем говорить). Выводят из него следствия и проверяют на практике.

Следствия постулата о постоянстве скорости света проверены с огромной точностью, подтверждена его плодотворность. Принятие любой другой предпосылки приведет в итоге к противоречию с опытными фактами либо логикой, вот и все.

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

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

Да, такое объяснение часто встретишь... Фигуру наблюдателя принято вставлять как бы для большей доступности, ведь всегда понятнее, если нарисован человек! Но такая детская «понятность» порой сбивает с толку. Будто бы есть субъективный момент: явления зависят от человека, которому что-то такое «кажется».

Меня тоже это смущает.

На самом деле **скорость** – понятие, имеющее конкретный смысл: это пройденный путь, поделенный на время.

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

А где находится лично экспериментатор – никакого значения не имеет. Никуда ему переходить не надо!

Но почему именно свет обладает таким необычным свойством?

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

О постулатах в физике

Честно говоря, мне кажется, что постулаты в физике неуместны. Наука должна изучать природу, а вовсе не устанавливать что-то произвольно.

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

А правомерность постулата подтверждается тем, что выводы из него оправдываются реальностью. Как только будет обнаружено расхождение – появляется повод для уточнения или пересмотра теории.

Тем не менее, введение Эйнштейном произвольных постулатов как-то смущает.

Вы ошибаетесь: никакого произвола нет. Так, независимость скорости света от движения источника это общее свойство любого волнового движения, и тут вряд ли кто станет спорить.

А одинаковость протекания любых опытов в каждой инерциальной лаборатории – это просто обобщение итогов массы накопленных к тому времени опытов.

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

Почему же в нынешних книгах они именуются постулатами?

Дело в том, что два этих принципа представлялись противоречащими друг другу. Если скорость света не зависит от скорости источника, значит, она зависит от свойств некоторой среды – «эфира». Появляется выделенная система отсчета.

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

Слово «постулаты» призвано просто подчеркнуть незыблемость принципов.

Эйнштейн отбросил очевидную несовместимость постулатов?

Эйнштейн 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.

Синхронизация часов

Почему изложение СТО начинают с вопросов синхронизации часов?

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

Ясно, что различные часы должны быть синхронизированными.

Пусть так. Другими словами, они должны иметь одновременно одинаковые показания. Но возникает вопрос, что же 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. В самом деле: если двое часов расположены в одном месте пространства, то их синхронизация очевидна.

Но синхронизация разнесенных, разноместных часов вовсе не ясна сама собой; тут не существует какой-то одновременности «по умолчанию». Если вообразим, что одно событие произошло рядом с нами, другое – на далекой звезде, то вопрос их одновременности уже не покажется элементарным.

Одновременность приходится вводить конвенционально, определением.

Пусть есть часы A , с ними надо синхронизировать другие, удаленные часы B . Просто отправим сигнал от A к B . И учтем поправку на время движения, исходя из скорости сигнала.

Мы уже говорили, что здесь порочный круг. Для расчета поправки надо знать скорость «синхросигнала», но, чтобы говорить о скорости, требуется заранее иметь синхронизированные часы!

Итак, при определении синхронности, одновременности – использовать понятие скорости нельзя.

Либо придется вводить скорость постулатом.

Почему же в обычной механике нет проблем с часами?

В механике Ньютона подразумевается «абсолютное» время, которое может быть востребовано в любой момент в любой точке (это постулат). Что соответствует взаимодействиям, распространяющимся мгновенно. Принципиально – с их помощью можно непротиворечиво синхронизировать все мировые часы.

Что значит «непротиворечиво»?

Мы ведь можем попытаться ввести синхронизацию произвольным сигналом. В нулевой момент часы A излучают сигнал. Получив его, часы B тоже обнуляются, вот и все. То есть, моменты отправки и получения сигнала считаем одновременными.

Но такое определение одновременности, в общем случае, не будет корректным. В чем мы можем убедиться, выполнив обратную проверку – часов A по часам B .

Обратная проверка сойдется лишь при условии, что путь сигнала по маршруту A – B – A требует нулевого времени! Существование подобных «мгновенных» взаимодействий предполагалось господствовавшей когда-то концепцией **дальнодействия**.

Что это такое, и причем здесь?

Следует вспомнить, что в механике Ньютона рассматриваются не только контактные взаимодействия (как, например, при столкновении тел), но также и дистанционные. Возьмем хотя бы закон всемирного тяготения.

Или электромагнитные явления – достаточно определить величины сил, а далее действуют те же законы механики.

В свое время принималось, что взаимодействие тел на расстоянии происходит так же, как и контактное: мгновенно, без задержки. Это и есть дальное действие.

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). Потому и требуется ненулевое время. Мы такой агент называем полем.

Получается, из-за того, что на самом деле не существует мгновенных взаимодействий, нельзя определить одновременность?

Нет, дело не в том. Можно было бы попросту объявить, что часы синхронны тогда, когда выполняются законы механики Ньютона – вот вам и определение.

Но на этом пути нас поджидает сюрприз: если существует взаимодействие, распространяющееся с конечной скоростью, то сама эта механика становится внутренне противоречивой, некорректной.

Относительность одновременности

Что я слышу? Неожиданное утверждение...

Удивлены? Не соблюдается, в первую очередь, третий закон механики: равенство сил действия и противодействия в инерциальной системе отсчета (ИСО). Изменение положения одного тела будет «почувствовано» другим, удаленным, только через некоторое время.

Рассмотрим мысленный эксперимент. Две покоящиеся частицы, скрепленные невесомой и «нейтральной» планкой, взаимно притягиваются. Естественно, все силы в системе уравновешены. Так, притяжение одной частицы со стороны другой компенсируется реакцией опоры.

Пусть такая же система частиц (номер два) движется равномерно вдоль направления соединяющей планки. Поле в каждой точке пространства меняется во времени. И вот тут начинается неразбериха.

А в чем дело?

Чтобы сразу стало ясно, рассмотрим крайнюю ситуацию: система движется со скоростью распространения взаимодействия. В этом случае поле от «задней» частицы никогда не достигнет «передней»!

Понимаю: передняя убегает со скоростью распространения поля...

Для движущейся системы третий закон Ньютона нарушился! Силы, действующие на какой-то из ее элементов, уже не уравновешиваются. Давление на планку слева и справа неодинаково.

Может, так и должно быть?

Хорошо, перейдем в ИСО системы номер два. Она теперь покоится точно также, как система номер один, помните? В разных ИСО одинаковые механические опыты долж-

ны давать одинаковые результаты – принцип относительности Галилея соблюдается неукоснительно.

Нарушение 3-го закона Ньютона означает несохранение импульса и энергии. Что противоречит всему корпусу опытных данных, а также фундаментальным принципам однородности пространства и времени.

Согласен. Но в чем же дело?

В том, что механика Ньютона несовместима с полем. Она должна быть пересмотрена. Этим (точнее, построением непротиворечивой теории электрона) занимались многие физики на рубеже XIX–XX веков, но успех пришел к Эйнштейну. Специальная теория относительности (СТО) объединяет две различные формы материи: вещество и поле, в этом ее суть.

Странно, я считал, что поводом для создания СТО был опыт Майкельсона.

Эйнштейн даже не знал о нем. На самом деле, результат Майкельсона в то время был уже предсказуем. Опыт этот любят авторы популярных пособий – за наглядность. Рассуждения не всех убедят, а тут нечто вещественное.

Но из описанного вами мысленного эксперимента вообще непонятно, как разрешить затруднение.

Это только так кажется.

Парадокс появляется, если мы принимаем постулат об абсолютности времени (следовательно, и одновременности).

Чтобы устранить мнимое нарушение законов Ньютона, следует считать, что в любой ИСО скорость распространения взаимодействий в любую сторону одинакова. Принять за постулат (вот откуда он взялся).

Что немедленно снимает парадокс.

Но возникает новый парадокс: как может скорость быть одинаковой в любую сторону в каждой ИСО, если они взаимно движутся?

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

Верно говорят, что СТО изобилует парадоксами...

На деле наоборот: парадоксы имеются в ньютоновой механике, и только СТО их успешно разрешает.

Пусть к нашим телам прикреплены часы. Пока часы неподвижны, они могут обмениваться взаимодействиями и тем самым синхронизироваться, имея в виду, что скорость передачи туда и обратно одинакова.

Пусть теперь часы движутся, но в сопутствующей ИСО неподвижны. Никто не мешает часам синхронизироваться точно таким же образом.

Однако в начальной ИСО часы уже будут несинхронными...

Да, и с этой мыслью придется примириться.

Я не понял, о каких взаимодействиях вы здесь рассуждали: электрических, магнитных, гравитационных?

В том-то и дело, что природа взаимодействия, как оказывается, не важна. Если существует хотя бы одно поле, распространяющееся не мгновенно, отсюда сразу же следует, что не может существовать мгновенных взаимодействий (например, какой-то другой природы). Потому что тогда возможна абсолютная синхронизация, а значит, парадокс сохра-

нился бы. По той же причине не могут существовать поля, распространяющиеся 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 это 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. Тогда не было бы и парадоксов с 3-м законом Ньютона: вещественная среда, «заливающая» Вселенную, принимала бы на себя силы противодействия.

Давно ясно, что это не так.

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

Синхронизация по Эйнштейну

Насколько мне известно, синхронизацию часов можно производить световым сигналом из точки, расположенной посередине отрезка?

Можно... только здесь фигурирует не слишком ясное понятие «середины» отрезка, соединяющего часы.

Что же тут неясного-то?

Вроде все понятно – но лишь в системе координат, к которой принадлежат часы. А если часы движутся? Чтобы найти серединную точку, придется засечь их положение одновременно – но это предполагает уже установленную синхронизацию часов в текущей ИСО. Опять порочный круг... Да и не факт, что результат будет тем же самым.

Лучше следовать Эйнштейну; его способ прямо основан на инвариантности скорости света и состоит в замере времени прохождения светом фиксированного отрезка между часами – сначала в одну сторону, а потом обратно. Время определяется, естественно, вычитанием показаний двух часов. Равное время туда и обратно свидетельствует, что часы синхронны, ну а если нет, их можно подвести.

А почему бы не поступить проще: сверить все часы в одном месте, а потом поместить 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 путями, разойдутся в показаниях – это проверено опытом.

Впрочем, в СТО можно доказать: если часы перевозить очень медленно, то ошибка невелика, а результат эквивалентен процедуре Эйнштейна.

Все-таки относительность одновременности кажется противоестественной, что ли.

Задумайтесь: нас же не удивляет, что в разных СО скорость конкретного тела не одинакова. Или что не абсолютен пройденный им путь. Просто это более привычно, чем время.

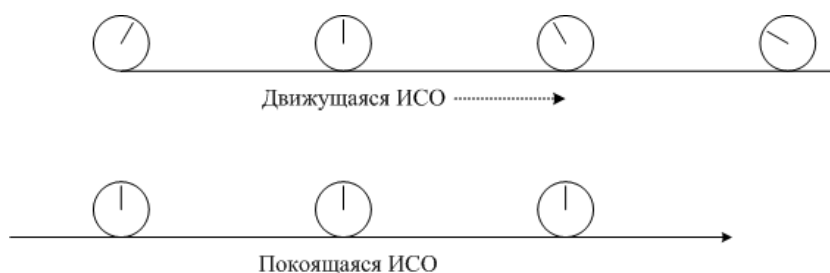
Часы движущейся ИСО разнесены в пространстве, световой сигнал идет от них к наблюдателю конечное время, тем большее, чем дальше они удалены. Может быть, тут и надо искать причину кажущейся неодинаковости хода этих часов?

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. А данный сюжет обособлен из-за его важности. А также потому, что об относительности одновременности частенько забывают сочинители «парадоксов СТО».

На качественном уровне надо представлять себе, что, если мимо движется система отсчета с множеством часов, то ее часы будут опаздывать тем больше, чем дальше они расположены вперед по направлению движения. Эффект взаимный: из второй ИСО – первая движется в противоположную сторону с отставанием часов по мере удаления в направлении уже ее движения:



Запомните эту простую картинку – она нам еще потребуется!

Эфир

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

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

Тогда в каком смысле СТО отрицает существование эфира?

Имеется в виду отсутствие выделенной системы отсчета, в которой скорость распространения света фиксирована (а в других – отличается). Оказалось, что она одинакова в любой.

Таким образом, не существует абсолютного движения, а любые инерциальные системы отсчета равноправны.

Для меня классическая механика с абсолютным пространством как-то понятнее.

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.

А по-моему, смысл эфира прежде всего в том, что это среда распространения волн. Иначе непонятно, 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 же вас смущает?

Вот что: пока волны на воде нет, все-таки остается сама вода. А если нет электромагнитной волны – мы имеем пустоту, поле равно нулю. Выходит, что колебаться предстоит пустоте?

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

Конечно, поле невозможно пощупать так, как воду, но его обиходную неосязаемость нельзя считать за отсутствие чего бы то ни было.

Но ведь поле равно нулю... как же еще прикажете заявлять?

Это не значит «нет». 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.

Вот вам пример: внутри гравитирующей сферы поле (гравитационное) равно нулю. Также оно практически ноль и на большом удалении от тяготеющих масс.

Кажется, и там, и там – поля одинаково «нет»? Однако часы, помещенные внутрь тяжелой сферы, замедлят свой ход, в тем большей степени, чем больше ее масса. Почему? Да потому что гравитационный потенциал ниже. Хотя напряженность поля равна нулю.

Ну, думаю, этого никто не проверял...

Хорошо, вот вам близкий пример: трансформатор. Почему в витках вторичной обмотки наводится напряжение?

Известно: оно индуцируется магнитным полем. Это поле вызывает движение зарядов в проводнике.

Но ведь там, где расположены витки обмотки, магнитного поля нет!

Как так нет?

Да вот так. Все магнитное поле сосредоточено внутри сердечника. А в зоне витков оно равно нулю. Что же тогда действует на электроны проводника?

Ну – не нулю, наверно...

Конечно, в реальном трансформаторе часть магнитных линий замыкается через воздух. Однако этот эффект только ухудшает работу трансформатора (так наз. индуктивность рассеяния)!

Мы даже можем сколь угодно увеличить диаметр витков, так, чтобы они находились на заведомо большом расстоянии от сердечника – это ничего не изменит.

Тогда в чем же секрет?

В том, что «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.

Опыт Майкельсона

Я знаю, что экспериментально отсутствие «эфирного ветра» было доказано опытом Майкельсона.

Очередное заблуждение. В течение всего XIX века проводились эксперименты, призванные обнаружить «снос» движущимся эфиром света и электромагнитного поля – в первом порядке величины $\frac{v}{c}$. Они ничего не обнаружили.

Как, еще до Майкельсона?

Конечно. Например, луч света, перпендикулярный направлению движения источника относительно эфира, должен отклоняться. От одной только орбитальной скорости Земли (30 км/с) отклонение на плече 10 метров (меридионального направления) составит 1 мм. Через 12 часов такое же отклонение появится в другую сторону и легко может быть обнаружено. Подобные опыты дают неизменно отрицательный результат.

Передовые физики того времени скорее были бы удивлены, 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 мы говорили, должно быть либо мгновенным (что явно противоречит опытам), либо иметь инвариантную скорость.

В чем суть опыта Майкельсона?

Майкельсон пытался обнаружить движение относительно предполагаемой механической среды распространения света.

Вернемся к проблемам сверки часов. Предположим, что двое часов синхронизируются акустически: устанавливаются в ноль по звуковому сигналу из точки, расположенной посередине между часами.

Если часы располагались на платформе, движущейся сквозь атмосферу, то они одновременны (просто по определению) в системе отсчета платформы. Но при сопоставлении с цепочкой других, неподвижных синхронизированных часов, обнаруживается, что часы платформы в каждый данный момент показывают разное время (относительность одновременности).

Можно обнаружить движение платформы относительно среды и внести поправку.

Верно. Замерять время, затрачиваемое сигналом на распространение вдоль фиксированного отрезка туда и обратно (например, с отражением на конце). Та система отсчета, в которой время будет наименьшим, покоится относительно среды.

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

Достаточно предположить, что эфир увлекается Землей, как результат Майкельсона понятен.

Нет. Опыт Физо, наличие абберации света звезд – все это несовместимо с такой гипотезой, что доказано выкладками. Разве только если считать, что Земля увлекает с собой эфир всей Вселенной...

Более адекватна теория **частично увлекаемого эфира**, которая господствовала некоторое время. Правда, и она не свободна от парадоксов.

Теория «частичного увлечения» объясняла отсутствие эффекта, но только в первом порядке. Более точные опыты должны были все-таки зафиксировать существование эфирного ветра. Майкельсон и Морли провели эксперименты, точность которых позволяла обнаружить **эффект второго порядка** (то есть пропорциональный $\frac{v^2}{c^2}$). Отрицательный результат окончательно похоронил все теории эфира, кроме теории Фитцджеральда-Лоренца.

Кстати, говорят, чуть ли не Лоренц и явился подлинным автором теории относительности.

Идеи носились в воздухе. Лоренц разработал теорию эфира, связанную с относительностью времени и сокращением длин движущихся тел. Пуанкаре обосновал математику преобразований Лоренца. Математически теория Лоренца дает тот же результат, что и СТО.

В соответствии с Лоренцем, эфир, хотя и существовал номинально, был необнаружим. Оставался последний шаг: отбросить в таком случае идею эфира, как излишнюю.

Тем более что концепция механического эфира уязвима из общих соображений.

Вот как, из каких же?

Поясню. Если тело движется в эфире, то можно связать с телом систему отсчета и говорить, наоборот, о движении в ней эфира, не так ли?

Конечно.

Но это очень странное движение. Скорость эфира (отношение пройденного эфиром пути ко времени) никак нельзя мыслить: в эфире как бы не за что зацепиться. Эта скорость не имеет физического содержания.

Значит, скорость эфира приходится понимать как-то иначе, условно – лишь по создаваемому им «эфирному ветру». Но вот оказалось, что и ветер отсутствует!

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

В его классическом значении – нет, это исключается.

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

Когда стало очевидным, что поле (электромагнитное, гравитационное) это самостоятельная материя, а не просто математический формализм – с этого момента идея эфира потеряла физическое содержание.

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

Здесь просто недоразумение. Дело в том, что подобные эксперименты многократно повторялись с точностью, на много порядков большей, чем те, давние.

Ссылка на Майкельсона это просто дань уважения. Его результаты это факт истории, а не современной науки.

События

В контексте СТО почему-то все время говорят о событиях. А не физических телах, например...

Это потому, что основой СТО являются преобразования координат.

Допустим, в геометрическом пространстве (трехмерном) задана система координат, тогда можно говорить о координатах некоей точки. Систем координат может быть сколько угодно, координаты той же 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?

Чтобы говорить о преобразовании координат при переходе в другую систему, конкретная точка должна быть как-то идентифицирована, помечена.

Я догадываюсь: можно поместить в нее материальную точку.

Хорошая мысль, но вот беда – вторая система координат может двигаться относительно первой, и математическая точка будет преобразовываться в линию. Без рассмотрения времени тут не обойтись!

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

Получили пространство Минковского?

О нем говорить преждевременно, пока мы не рассматриваем метрические свойства. Попросту говорим об отсчете времени, который добавляется к трем пространственным отсчетам.

Событие математически точно, в какую бы систему координат мы ни перешли – вот почему оно принято за базовое понятие.

Что такое событие – можно дать определение?

Можно дать пояснения.

Во-первых, событие – факт физически абсолютный, **инвариант**. Если оно случилось, то никак не может не найтись наблюдателя (системы отсчета), для которого оно не произошло и никогда не произойдет.

Во-вторых, событие можно привязать к определенной пространственной точке и к определенному моменту времени, если только выбрана система отсчета. То есть оно характеризуется в ней четырьмя координатами x, y, z, t .

Преобразования Лоренца

Формулы преобразований Лоренца всем известны.

Тем не менее, стоит их напомнить:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Для краткости применяют обозначение: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ (это **фактор Лоренца**, боль-

ший единицы).

Из формулы для координаты получается, что длина движущегося отрезка: $x_2' - x_1' = \gamma(x_2 - x_1)$ – увеличивается по сравнению с длиной покоящегося ($x_2 - x_1$). А в книгах утверждают, что, наоборот, сокращается...

Рассуждая по-вашему, мы получим, что и время движущейся ИСО ускоряется, а не замедляется...

Точно! Но, возможно, я что-то не учитываю?

Вы просто не понимаете, что такое преобразования Лоренца.

Ну, как же: это формулы для преобразования координат движущихся тел.

Неправильно.

Ну, пусть не тел, а материальных точек. Движущихся с релятивистской скоростью.

Опять неправильно. Эти преобразования не имеют отношения к движению каких-либо тел или материальных точек. Преобразования Лоренца касаются только событий. Они имеют отношение к пересчету координат событий.

Движущихся друг относительно друга?

События не могут быть движущимися или покоящимися, это бессмыслица. Преобразования Лоренца имеют отношение к движению систем отсчета.

Они отвечают на простой вопрос: если известны координаты данного события в некоторой системе отсчета – каковы его координаты, измеренные средствами другой ИСО? Разумеется, что другая ИСО движется относительно первой, а иначе задача тривиальна.

И из теории относительности Эйнштейна следует, что координаты в другой ИСО будут другими?

Эйнштейн ни при чем, они будут другими и в нерелятивистской механике. Там тоже существует относительность, количественно выражаемая **преобразованиями Галилея**.

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 эти t' и x' – смотри формулы.

Раньше мне казалось, что я понимаю. Боюсь, что теперь я запутался...

Надеюсь, что, напротив, все встанет на свои места – когда мы далее разберем частные вопросы. Как преобразуется движение (и поле!) при переходе к другой ИСО – собственно, этому отчасти и посвящено дальнейшее.

В формуле преобразования Лоренца для времени меня смущает второй член в числителе. Даже при малых скоростях – найдется такая координата x , при которой времена разных систем отсчета значительно разойдутся. Разве эффекты СТО не должны проявляться лишь при релятивистской скорости?

Ничего странного. Это слагаемое в числителе обусловлено немгновенным распространением взаимодействий! Понятно, что на значительных дистанциях различие в синхронизации часов, вызванное теми обстоятельствами, которые мы уже обсуждали ранее, обязательно скажется. В данном слагаемом и прячется относительность одновременности, помните?

Собственно, никакого «эффекта СТО» в указанном вами обстоятельстве нет. Речь идет только о различии координат (в частности временных) в разных системах отсчета. Заметьте на будущее, что эффекты первого порядка величины $\frac{v}{c}$ всегда обусловлены конечной скоростью распространения взаимодействий. А чисто релятивистские имеют второй порядок.

Преобразования Галилея все-таки 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. Но, согласитесь, если уж апеллировать к «здравому смыслу», то подобное предположение странно!

Так 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!

Не торопитесь, такое требуется, только если принят постулат о равноправии систем отсчета.

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

В заключение отмечу еще кое-что. Подставьте в формулы Лоренца вместо t величину ct (отличающуюся лишь коэффициентом) – например, обозначив ее новой буквой. Вы убедитесь, что преобразования для x и для (ct) полностью совпали!

И что отсюда следует?

То, что время симметрично с любой из пространственных координат – это факт важнейший.

Релятивистский интервал

Я знаю, что из преобразований Лоренца следует инвариантность интервала.

Нередко, наоборот, отталкиваясь от инвариантности интервала, получают преобразования Лоренца.

Хорошо, но нельзя ли разъяснить здесь основную идею?

Во многих задачах фигурируют два события, и требуется рассматривать пространственные и временные соотношения между ними. Ясно, что пространственные (Δr) и временные (Δt) промежутки будут разными в разных системах отсчета.

«Ясно», если только принять справедливость 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, что логично, ведь и сами они физически являются инвариантами. Величина, называемая **релятивистским интервалом**, неизменна в любой ИСО. Квадрат этой величины выражается так:

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

Интервал имеет размерность длины.

Это мне знакомо, только я никогда не понимал особого смысла в этом «интервале».

С математической точки зрения, интервал выражает **метрику** пространства-времени, «точками» которого являются события.

Метрика – это своеобразное расстояние между точками. Оно не должно зависеть от выбора осей координат. В четырехмерном **пространстве Минковского** x, y, z, t переход к другой ИСО – это четырехмерный поворот осей координат, а метрика остается неизменной. Математики называют такое пространство **псевдоевклидовым**: в нем выполняется теорема Пифагора, но своеобразно – в формуле, вместо всех плюсов, присутствуют, как видим, и минусы.

Интервал легко позволяет перейти к инвариантной (независимой от координатной системы) **тензорной форме** записи физических законов.

Интервал полезен и практически.

Чем именно?

Упрощает решение задач, позволяет проводить быстрый анализ.

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

Понятно: разность должна сохраниться постоянной.

Да. И здесь 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 этой ИСО в одной точке пространства. Здесь и промежуток времени минимален.

Интервалы, выражаемые действительным числом, принято называть **времениподобными**. События могут быть причинно связаны: более позднее является следствием раннего.

А откуда вдруг взялись причины и следствия?

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

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

Кажется, да. Ведь 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: при движении частицы мы имеем цепочку причин и следствий.

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

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

Что за чушь...

А вот 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? Но ведь длина может сделаться нулевой разве что при движении со скоростью света...

Нет, это не сокращение длины.

Длина это пространственный промежуток, разность некоторых координат. Но не всякий пространственный промежуток это длина. Времениподобный интервал не определяет никакую длину (хотя Δr присутствует). Он определяет **собственное время**. Об этом будет далее.

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

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

Но мнимый интервал так не измеришь...

Да. Но линейка прямо измеряет пространственноподобный интервал между событиями, если только они одновременны в ее ИСО.

Я читал, что существует и светоподобный интервал.

Равный нулю. Он характерен для событий, разделенных распространением света (или вообще безмассового объекта, движущегося со скоростью света).

Четырехмерное пространство-время

Мне кажется, что «пространство Минковского» с его метрикой $\sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2}$ – надумано, искусственно, просто математический фокус.

Вы неправы. В **4-пространстве** законы физики приобретают форму, не привязанную к конкретной ИСО. Они характеризуют сами явления, а не выбранную систему отсчета (логично, верно?) Обнаруживаются взаимосвязи между понятиями и величинами, в нерелятивистской физике казавшимися разнородными.

По этой причине в СТО не может быть инвариантных трехмерных векторов; привычные по школьной механике векторы превращаются в **четыре-векторы**, приводящие к инвариантам.

Например?

Один пример – это четырехмерный радиус-вектор события. Он получается дополнением пространственного радиус-вектора \mathbf{r} временной координатой ct . Его длина – известный нам инвариантный интервал.

Так ведь интервал – он всегда между двумя событиями!

Правильно, первое событие – это начало координат.

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

Движутся трехмерные пространственные координаты. А 4-координатные системы имеют общее начало (имея в виду момент времени $t = 0$). Начало координат это некоторое событие.

Приведу еще примеры. Три координаты вектора скорости дополняются до **4-скорости**, которая становится инвариантом, причем безразмерным: длина четырехкомпонентного вектора всегда равна 1.

Странно.

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

Для 4-скорости дифференцирование координат по времени (время оказалось тоже координатой!) заменено дифференцированием по инвариантному интервалу.

Существует и 4-ускорение; интересно, кстати, 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 координатам, а четвертая равна $\frac{E}{c}$ (E – это полная энергия).

Такой вектор тоже является лоренц-инвариантным: при переходе в другую ИСО его компоненты меняются в соответствии с преобразованиями Лоренца, а вот 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, что здесь нащупываются фундаментальные закономерности.

А вот интересно: вектор силы тоже превращается в 4-вектор?

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

В привычном евклидовом пространстве, если (при повороте осей координат) увеличивается одна из составляющих вектора фиксированной длины, какие-то другие должны уменьшиться. Но в псевдоевклидовом пространстве СТО это не так: если возрастет, например, «временная» составляющая, то должна будет увеличиться хотя бы одна из «пространственных», чтобы длина не изменилась.

Честно говоря, эти четырехвекторы не очень понятны...

Если захотите, то сможете освоить вопрос по серьезной литературе. А здесь цель другая: пояснить, что четырехмерное представление (свойственное СТО) выявляет неожиданные симметрии в природе. Разумеется, это дает материал для фундаментальных обобщений и осмыслений, куда более содержательный, чем наивные «гипотезы» малообразованных любителей науки.

Замедление времени – 1

Замедление времени движущихся часов относительно покоящихся кажется мистикой. Да и противоречит логике: время в **A** идет медленнее, чем в **B**, но и в **B** медленнее, чем в **A**. Абсурд?

Нет, просто – иллюзия понимания вместо подлинного понимания. Попробуем разобратся.

Время движущейся материальной точки (или частицы) можно отсчитывать часами, находящимися в этой точке, тогда оно называется **собственным временем**.

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

Можно начало промежутка времени отсчитывать по часам некоторой системы отсчета, против которых находится частица. Конец – по другим часам, находящимся в точке, где теперь оказалась частица (но синхронным с первыми часами) – это будет **координат-**

ное время частицы. Координатное время всегда больше, чем собственное, в этом и состоит таинственное «замедление времени», и более ни в чем. Фактически, тема на этом исчерпана!

Так просто? Но тогда я ничего не понял, а раньше казалось, что понимаю.

Что же, придется объясниться детальнее. Но сначала вопрос вам. Есть двое часов, взаимно движущихся. Которые из них идут быстрее?

Ну, СТО утверждает, что покоящиеся... тут-то и непонятно: какие считать неподвижными?

Вы заблуждаетесь, ничего подобного не утверждается. На самом деле, 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?

Можно одни часы затормозить и приложить к другим...

Тогда, уж 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, вот и все.

Выводы:

1) Никакого логического противоречия, как видим, нет – сравнение времени несимметрично, показания одних часов *A* сравниваются последовательно с показаниями цепочки часов системы отсчета *B*.

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

2) Не имеют смысла вопросы, которые часто слышишь: это реальный эффект или кажущийся? Это 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.

Вы спорите с тем, что написано в любой книжке?

Нет, не спорю. В самом деле, важно взаимное движение: наших часов – и линейки часов, считающихся синхронными. После того, как мы выбрали конкретную ИСО, движение становится, так сказать, «абсолютным», вот в этом смысле и надо понимать общепринятые утверждения.

Я запутался: большой промежуток времени по часам – время ускорено? Или, наоборот, замедлено (те же самые процессы теперь занимают больше времени)?

Ход часов соответствует скорости физических процессов, это такой же процесс, как и другие. Любые процессы по своим часам (часам «своей» системы отсчета) идут с неизменной скоростью и ни капли не замедляются. «Замедление времени» это просто координатное представление некоторых процессов (к примеру, хода часов) в разных системах отсчета.

Замедление времени – 2

А что там с преобразованиями Лоренца?

Легко получается соотношение: $t_2' - t_1' = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma(t_2 - t_1)$. Его только надо правильно понять (иначе можно, и вправду, придти к тому, что время не замедляется, а ускоряется).

Так и выходит: ведь штрихованные координаты – это всегда в движущейся системе...

Нет, такое рассуждение наивно. Анализ следует начать с того, о каких событиях пойдет речь.

Пусть t_1 и t_2 – два показания одних часов (вот вам два события). Поскольку координата x часов в сопутствующей ИСО фиксирована, то члены с x сокращаем и приходим к приведенной формуле.

По смыслу преобразований Лоренца, t_1' и t_2' – временные координаты этих же событий в ИСО, в которой часы движутся. А значит, эти показания снимаются с пространственно разнесенных часов (считающихся синхронными). То есть, именно эта (штрихованная) ИСО условно «неподвижна». Как видите, все сходится: здесь промежуток времени больше.

А если считать неподвижной, наоборот, «нештрихованную» ИСО?

Пожалуйста, но тогда часы будут в ней двигаться, $x_1 \neq x_2$, и сократить x не удастся. Нужно будет учесть преобразование Лоренца и для координаты. А результат получится тот же самый.

Я верю. И вроде бы улавливаю логику, но замечаю, что рассуждения оказываются не слишком-то прозрачными...

Это самый ценный вывод, который вы могли бы отсюда вынести. Анализ задачи, строгие логические рассуждения – требуют напряжения. То, что приходит в голову сходу, что кажется очевидным, соответствующим «здоровому смыслу», чаще всего ошибочно. И уж, конечно, недопустимо бездумно применять формулы.

А причем тут интервалы, о которых вы начали говорить?

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

Да: существует система отсчета (сопутствующая), в которой эти часы неподвижны, и все события происходят в одной точке пространства.

Верно. Любые процессы, касающиеся этих часов, будут занимать по ним наименьшее время – по правилу инвариантности интервала.

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

И все равно у меня путаница. Некий процесс по своим (движущимся) часам занял пять минут, а по неподвижным прошло десять. Выходит, что время в его (то есть движущейся) ИСО – идет быстрее?

Еще раз: время идет быстрее всего в своей ИСО. Ваши пять минут – это собственное время, и оно абсолютно, откуда на него ни смотри. А иначе нарушилась бы причинность – помните?

Замедление обнаруживается тогда, когда процесс измеряют часами другой, не сопутствующей ИСО.

Сокращение длины

Собственной длиной называют расстояние между отметками на координатной линейке.

Понятно. А в движущейся ИСО она сокращается.

Что вы говорите? Нет, собственная длина это абсолют, как и собственное время. Ничто не сокращается, речь о другом: некоторое ее координатное представление оказывается меньше собственной длины.

А именно: если этот отрезок засечь из другой ИСО, то расстояние между отметками, перенесенными в ту ИСО, окажется меньше. Разумеется, «перенос» концов отрезка осуществляется одновременно по часам новой ИСО (таким образом, длина всегда пространственноподобна).

Рассмотрим 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 $\gamma > 1$...

Нет, она означает всего лишь, что в новой ИСО увеличивается разность координат некоторых событий. Каких? Очевидно, тех, которые в исходной ИСО были одновременны (одна и та же величина t сокращается в формуле).

В новой же («штрихованной») ИСО эти события неодновременны.

Секрет «сокращения длины в том, что в ИСО, в которой отрезок покоится (сопутствующей), моменты засечки положения концов не обязаны быть одновременными: точки никуда не уедут! А в любой другой ИСО – события засечек должны быть одновременными, чтобы измеренная разность координат имела смысл длины.

Таким образом, в нашей формуле $x_2' - x_1'$ может быть только собственной длиной. А $x_2 - x_1$ представляет длину движущегося отрезка. Так что с сокращением все в полном порядке.

По общему принципу, длина отрезка минимальна в той ИСО, в которой события засечки его концов одновременны. При переходе к сопутствующей ИСО отрезка эти события становятся неодновременными, именно потому собственная длина больше.

Но ведь из равноправия ИСО следует, что этот эффект как бы взаимный?

Конечно. Перенесем одновременно – но теперь уже по часам отрезка! – его концы на линейку, движущуюся относительно него. В новой ИСО обнаружится, что расстояние между метками больше!

Если движущийся стержень сжимается, то откуда берется энергия на это сжатие? Оно реальное?

Да, реальное – в том смысле, что подтверждается измерениями. Но здесь нет динамического сжатия: в своей ИСО тело ничуть не меняется. То есть, с собственно стержнем ничего не происходит, а иначе получилось бы, что какие-то процессы зависят от системы отсчета!

Однако это хороший вопрос. Мы вправе рассматривать тело из любой системы отсчета, и его длина, какова бы ни была, физически закономерна. В движущейся ИСО деформируются и силовые поля, удерживающие частицы тела на определенных расстояниях. Если вообразить некое сложное уравнение, определяющее размеры стержня, то в результате преобразования в движущуюся ИСО оно должно приводить к той самой сокращенной длине, которая просто следует из преобразований Лоренца.

Но откуда такая уверенность, что одинаково сократятся совершенно разнородные объекты, в которых, возможно, действуют разные физические законы?

Из чисто кинематического механизма «сокращения длин». Вспомните об относительности одновременности, и рисунке, который я просил запомнить! Время движущегося стержня неоднородно, передний его конец живет в «отставшем» времени, а задний же, наоборот, забегает в будущее. «Хвост» сближается с «носом» именно потому, что с точки зрения «неподвижной» ИСО они просто находятся в разном времени! Гарантом эффекта является равноправие ИСО.

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

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

Сложение скоростей

Из преобразований Лоренца вытекает формула сложения скоростей Эйнштейна. Но мне почему-то кажется, что она противоречит простой арифметике, например, из нее выходит, что $c + c = c$.

Нет, не противоречит, и не выходит.

Кстати, применение этой формулы для $v_1 = v_2 = c$ вообще бессмысленно: никакая система отсчета не может двигаться со скоростью света (мы еще к этому вернемся).

Пусть событие имеет известные координаты в первой ИСО. Чтобы пересчитать их во вторую ИСО, движущуюся относительно первой со скоростью V , мы применяем формулы преобразований Лоренца.

Пусть теперь имеется третья ИСО, движущаяся со скоростью v относительно второй. Можно пересчитать координаты из второй ИСО в третью.

Можно было пересчитать из первой сразу в третью...

Совершенно верно. Получим тот же результат, только вот вопрос: какую скорость третьей системы относительно первой мы должны подставить?

Я, конечно, догадываюсь, что не $V + v$.

Да. И ничего парадоксального в этом нет. Вас же не удивляет, что нельзя арифметически складывать абсолютные величины скоростей, если векторы направлены не по одной линии? В СТО правило сложения – не правило параллелограмма, а более сложное.

Обычно приводят формулы для двух крайних случаев. Если v_1 и v_2 направлены

одинаково, то:
$$v' = \frac{V + v}{1 + \frac{Vv}{c^2}}$$

Если скорости перпендикулярны друг другу, формула проще: $v' = \frac{v}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$ (она очевидна: эффект связан здесь только с замедлением времени).

Вы как-то странно изложили вопрос. Я ожидал, что будет рассмотрено движущееся тело...

Сейчас рассмотрим. Это, кстати, подведет нас к вопросам релятивистской динамики.

Пусть тело движется в ИСО со скоростью v_1 . Перейдем в сопутствующую ИСО, где тело покоится. Дадим теперь телу новую скорость v_2 – уже в этой, второй ИСО.

Тогда итоговая скорость тела в первой ИСО должна рассчитываться по вышеприведенным формулам. А из них видно, что, каковы бы ни были v_1 и v_2 , тело не сможет достичь скорости света. То есть, добавки скорости в сопутствующих системах отсчета, сколько бы и каких ни было, никогда не приведут к превышению скорости света.

Отсюда следует, что движение со скоростью больше световой невозможно?

Оно вполне возможно! Например, фазовая скорость электромагнитных волн (да и любых волн) может быть большей c . Сколь угодно большую скорость может иметь точка пересечения, например, лезвий ножниц (когда они почти параллельны).

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

Интересно: для сверхсветовых скоростей формула тоже справедлива?

Вполне. И, кстати, здесь возможны любопытные эффекты. Например, 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.

Возвращаясь к теме, следует подчеркнуть, что никакой сменой ИСО нельзя превратить движение с досветовой скоростью в сверхсветовое. Справедливо и обратное!

Поясните: пусть световая волна и тело движутся навстречу друг другу, какова скорость их сближения?

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

А как же формула релятивистского сложения скоростей?

Она относится только к переходу в другую ИСО, чего в данном случае нет. В самом деле, термин «сложение скоростей» может сбить с толку; лучше говорить о **преобразовании скорости** при переходе в другую систему отсчета.

Говорим, что скорость больше скорости света невозможна, а вот же получили $c + v$?

А 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. Ничто материальное не движется в вашей задаче со скоростью, большей c , ни в какой ИСО.

Как же ничто? Относительно тела свет движется со скоростью $c + v$, разве это не противоречит постулатам?

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

Перейдем в систему отсчета тела – и должны будем использовать релятивистскую формулу для пересчета скорости.

Не пойму, почему «относительно тела» это 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.

Все же странно, что векторы могут складываться не по правилам сложения векторов...

Просто эти векторы относятся к разным системам отсчета! А правило сложения действует в математике, естественно, в одной конкретной координатной системе.

В обычной механике преобразование скорости могло осуществляться через векторное сложение единственно потому, что время считалось инвариантом. В таком случае это преобразование эквивалентно просто суммированию перемещений (для которого правило параллелограмма справедливо).

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. Вопрос не глупый, положительный ответ получается просто из формулы, но, если смотреть глубже, он вытекает из фундаментальных симметрий (на которых и базируется СТО).

Парадокс близнецов

Я в курсе, что «парадокс близнецов» на самом деле не парадокс. Близнецы неравноправны: тот, кто путешествовал и вернулся в исходную точку, подвергался действию ускорений. Задача не для СТО, где рассматриваются только равномерные прямолинейные движения, а для общей теории относительности (ОТО).

Я вынужден возразить: здесь нередкое недоразумение. Ничто не мешает рассматривать в СТО произвольные движения. Более того, СТО ухитряется рассматривать и неинерциальные системы отсчета. Задача именно для СТО!

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

Пусть один из близнецов «неподвижен» – остался на Земле, другой, сверив с ним часы, отправился в путь. Забудем об ускорениях: он может синхронизировать 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. Движущемуся наблюдателю, наоборот, должно казаться, что отстают часы неподвижного...

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 это Земля (вместе с финишной точкой) ехала в обратную сторону, а космонавт покоился?

Пожалуйста: если рассмотреть ИСО, связанную с ракетой, то 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 сохраняют 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, и никакого отношения к задаче больше уже иметь не будет.

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 перенесено 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.

Все дело в переходах между системами отсчета.

А если рассматривать Землю?

Земля не меняла сопутствующей инерциальной системы отсчета. В этом-то и состоит неравноправие близнецов.

Вы ловким трюком исключили ускорения, а если все-таки их учитывать?

Задача решается и впрямую. Рассматриваем события расставания и встречи близнецов. Собственное время тела при его инерциальном движении это просто релятивистский интервал. Но при произвольном движении (путешественника) связать с ним одну ИСО уже нельзя. **Мировую линию** разбивают на малые «почти инерциальные» отрезки и суммируют: собственное время равно интегралу. В 4-пространстве это «длина» мировой линии. Что и позволяет сравнить, как шли чьи-то часы между двумя сверками времени.

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. Таким образом, 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 на близнецов.

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

На такой вопрос ответа нет. Точнее (если опустить бессмысленные слова: «на самом деле») – ответов сколько угодно разных. Ведь чтобы сравнить возраст (или, что то же, показания часов), надо засечь их **одновременно**. События, одновременные в какой-то ИСО, являются пространственноподобными; что можно о них сказать?

Помню: в других системах отсчета любое может оказаться случившимся раньше или позже...

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

Ничего не прокручивается: время Земли это собственное время, и оно, конечно, не зависит от путешественника. В зависимости от перехода между системами отсчета изменяются **временные координаты** событий.

В школьной физике при смене ИСО изменяются координаты и скорость тела. При торможении автомобиля – в его сопутствующей СО тормозит, наоборот, Вселенная, и это не кажется странным! Менее привычно, что может измениться и временная координата.

Существует сколько угодно систем отсчета, и, переходя между ИСО, мы просто каждый раз пользуемся другой линейкой часов. На сами часы дальней точки это не оказывает влияния, конечно.

Длина пробега мюонов

Этот пример упоминается в любой книжке по СТО...

Действительно, одной из иллюстраций СТО считается длина пробега короткоживущих элементарных частиц, например, мюонов, образующихся в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей.

Я знаю, что у мюонов очень 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.

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. Раз время жизни больше, значит, и расстояние в этой ИСО будет пройдено большее.

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

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

В сопутствующей ИСО время жизни будет, разумеется, нормальным (собственным). Зато длина пути, который ей предстоит преодолеть, летящего ей навстречу, 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.

Свет и фотоны

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.

Но фотон же движется!

Фотон не имеет массы, ему можно. Но связать с ним систему отсчета нельзя.

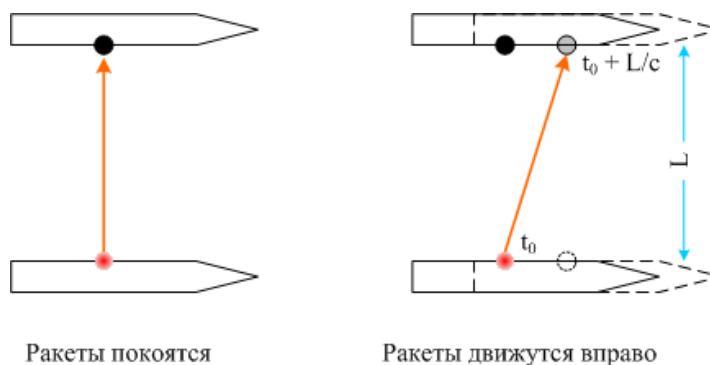
Системы отсчета, движущиеся с относительной скоростью c и выше, просто не входят в сферу компетенции СТО. Можно гипотетически предположить, что таковые существуют, тогда они находятся как бы в разных вселенных. Но это уже область фантазий...

Но почему с фотоном нельзя связать систему отсчета?

Хотя бы потому, что тело отсчета неподвижно в своей СО. В случае света тут было бы противоречие: он принципиально не может покоиться.

Хорошо, еще вопрос. 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 ваш вопрос: в «неподвижной» ИСО каждая частица света вроде бы должна тогда двигаться не перпендикулярно вектору скорости ракеты, а по гипотенузе:



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 же он летит под углом? Лазер-то направлен прямо, как и ранее.

Я мог бы ответить: изменилась геометрия пространства-времени. Но ответу 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?

Тут другое дело: в «неподвижной» ИСО пуля движущегося ружья приобретает добавочную составляющую скорости, обусловленную движением ракеты. Два эти компонента в сумме дают вектор скорости, направленный не туда, куда смотрит ствол ружья.

Ну, видите! И у света есть скорость, вот и ответ.

Подождите, как же так? Движение света не зависит от движения источника – это постулат.

Неправильно, такого постулата нет. Есть постулат, что **скорость** света не зависит от движения источника.

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

Учтите, что преобразования Лоренца не обязаны сохранять углы!

Все равно непонятно, как физически лазер, направленный точно в сторону, испускает свет под наклоном.

Так ведь разные точки апертуры движущегося лазера в «неподвижной» СО не одновременны: 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.

Аберрация света

Я слышал мнение, что аберрация света звезд опровергает СТО, потому что дает возможность обнаружить абсолютное движение. Например, орбитальное движение Земли вокруг Солнца.

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

Этот аргумент понятен. Но хотелось бы убедиться предметно.

Хорошо. В астрономии аберрация – это видимое смещение звезд в сторону движения наблюдателя. Аналогично тому, как прямой дождь окажется косым (бьющим в лицо) для бедолаги, которого везут в открытом автомобиле.

Это ясно – с точки зрения классической физики.

Вот как раз с точки зрения классической физики и сомнительно. Действительно, пусть волновой фронт параллелен траектории движения наблюдателя, тогда эта параллельность не зависит от его скорости! Чтобы объяснить аберрацию, придется представлять свет не волнами, а корпускулами, частицами (аналогично дождю).

Так ведь свет это и есть фотоны!

Да, но фотоны – отнюдь не классическая физика. И теория фотонов основана на СТО, как мы увидим.

Ладно, а все-таки – позволяет ли смещение положения звезд обнаружить абсолютное движение наблюдателя?

Вовсе нет. По смещению мы просто фиксируем переход в другую ИСО, которая не лучше и не хуже прежней.

Все-таки мне кажется, что аберрация противоречит постоянству скорости света, а значит, принципу равноправия всех ИСО.

Здесь у вас две ошибки.

Во-первых, постоянство скорости света не эквивалентно равноправию ИСО – это два разных принципа.

Во-вторых, не забывайте, что постулат вовсе не устанавливает неизменность направления света!

Тогда как в СТО объясняется аберрация?

Собственно, к СТО явление имеет мало отношения. Аберрация – эффект первого порядка. Такие эффекты обусловлены всегда конечной скоростью распространения взаимодействий.

Скажите, по-вашему, звезда находится на том направлении, где мы ее видим?

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

Совершенно верно. Глаз, фотоаппарат и т.п. – достраивают воспринимаемый в текущий момент световой луч, проецируя его на условную небесную сферу.

Пусть наблюдатель изменил свое движение – перешел в новую сопутствующую ИСО, движущуюся с некоторой скоростью относительно прежней. Для него теперь источник света изменил свою скорость как раз на эту величину, не так ли?

Допустим...

Понимаю: вам кажется странным, что, как только некто начал двигаться, в его новой системе отсчета все звезды Вселенной приобрели такую же добавочную скорость? Но ведь так оно и есть, хотя «здравый смысл» противится! Значит, наблюдатель должен увидеть теперь звезду там, где она находилась миллион лет назад, при условии, что имела эту дополнительную скорость. Понятно, что это будет смещенная позиция.

Но выявить таким образом свою какую-то абсолютную скорость наблюдатель не может. Как пассажир не может по направлению дождевых капель определить истинную скорость движения автомобиля (сам дождь может быть косым).

Просто задумайтесь: если бы Земля двигалась не по круговой орбите, а всегда строго прямолинейно – можно ли было бы зафиксировать звездную аберрацию? И все станет ясно.

Повторяю, это эффект первого порядка, и СТО тут ни при чем. Расчет по СТО вносит некоторые поправки второго порядка, но они незначительны.

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

Это с точки зрения классических взглядов, а в СТО как раз все объяснимо. При переходе в другую ИСО – в прежней 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). Что и соответствует наклону направления на звезду вперед по ходу движения.

Эффект Доплера

Я слышал также, что наличие эффекта Доплера опровергает постулат о равноправии систем отсчета. Ведь 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. Вроде бы эффект Доплера свидетельствует о том, что Солнечная система движется в сторону созвездия Девы со скоростью 370 км/с. Это абсолютное движение?

Это всего лишь доказывает, что она движется относительно некоего конкретного источника, скажем, центра гипотетического Большого взрыва. Никакая «абсолютная система отсчета» этим не найдена.

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

Вы повторяете прежнюю ошибку. От движения источника не зависит только скорость света. Но эффект Доплера вовсе не связан с изменением скорости волны. Меняется **длина волны**.

А вот другие параметры излучения (импульс и энергия) очень даже зависят от движения источника.

Тогда можно ли считать, что изменение длины волны (эффект Доплера) как-то связано с релятивистским изменением длин?

Нет, это неверно. 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 здесь те же события уже 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 (то есть пропорциональные v/c) не зависят от движения относительно среды распространения (если таковая существует), а только от относительного движения источника и приемника. Поэтому расчетные колебания периода обращения спутников Юпитера (а это тот же самый эффект Доплера) практически не меняются от того, считать ли скорость света фиксированной относительно Земли, или относительно Солнца, или инвариантной.

Считайте, что суть эффекта Доплера в изменении расстояния между источником и приемником. Если оно, например, растет, то должно все больше заполняться волнами, которые из источника вышли, а до приемника не дошли. Эти 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 уж говорить о наблюдениях Рёмера, при известной скорости движения Земли по орбите поправка получается меньше, чем 10^{-8} . Обнаружить ее астрономическими средствами непросто.

Эффект Саньяка

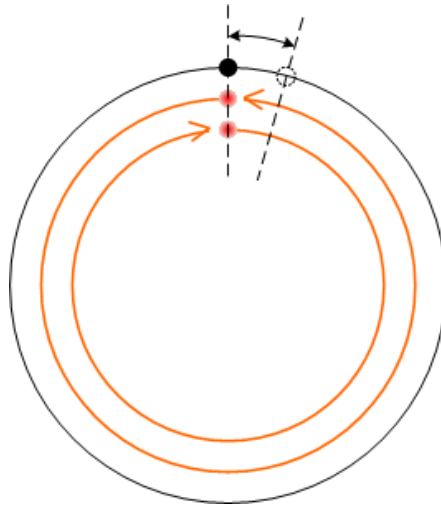
Я слышал, что с помощью вращающегося интерферометра эфир все-таки был обнаружен.

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. Причем разность хода зависит от скорости вращения.

Эффект используется в лазерных гироскопах.

Но разве он не свидетельствует, что есть неподвижный эфир, относительно которого распространяется свет?

Я слышал такие мнения. Что поразительно: ведь суть дела проста и понятна даже ребенку. Из некоторой точки прибора 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. И за время облета светом окружности – излучатель сместился на некоторый угол, вот и все. Наши лучи достигли его не одновременно... и причем же тут эфир?

И как могло быть по-другому? То есть, да, могло: в баллистической теории, когда корпускулы приобретают дополнительно скорость источника. Но то, что баллистическая теория неверна, хорошо известно (и данным опытом еще раз подтверждено).

Теперь я вижу, что все просто...

Обычный эффект первого порядка, связанный с конечной величиной скорости света. Как нам уже известно, подобные опыты не могут ни подтвердить, ни опровергнуть СТО.

Оговорюсь: это объяснение упрощено, релятивистские эффекты сказываются, но, как и всегда, только во втором порядке. Кстати, точный расчет по СТО показывает, что эффект второго порядка должен наблюдаться даже в случае корпускул!

Быть может, настораживает то, что здесь обнаруживается абсолютное движение!

Обнаруживается абсолютное вращение. И это ничему не противоречит, вращение обнаруживает и просто ведро с водой.

Но в системе координат интерферометра выходит, что скорость света в обе стороны различается. Что противоречит постулату!

Да, здесь и ищут повод для поверхностных аналогий. Поступательно движущийся интерферометр ничего особенного не обнаруживает, из чего сделан вывод, что эфира нет. А вот вращающийся – обнаруживает! Следовательно...

Но аналогия ошибочна. Система отсчета вращающегося интерферометра не является ИСО, к ней не относятся постулаты Эйнштейна.

Впрочем, локально, на малом отрезке окружности, скорость света в СО все равно одинакова в обе стороны, ведь она – следствие принятой процедуры синхронизации часов.

Интересное дело: на каждом отрезке окружности скорость света постоянна, а в итоге получается разной?

Различной выходит **средняя скорость** на определенном пути. А кто обещал, что будет иначе? Причина в парадоксальности пространства-времени, связанного с вращающимся интерферометром. Конкретно, в невозможности непротиворечиво синхронизировать время вдоль окружности.

Хорошо, еще возражение: пускай система отсчета вращающегося кольца не инерциальна; однако в ней оно неподвижно, а поэтому нет выделенного направления. Как же может быть, что для света – пути по и против часовой стрелки неравноправны?

Это только так кажется, что ситуация симметрична. Например, если некоторое тело начнет двигаться по радиусу кольца, появится сила Кориолиса, направленная в зависимости от направления абсолютного вращения. Во вращающейся системе мы можем внутренними средствами определить направление вращения!

ИСО, движущиеся поступательно, равноправны. Но вращающиеся СО неравноправны – не все это понимают, отсюда и путаница!

Уточняем закон Ньютона

Странно, что до сих пор вы почти не упоминали о движении материальных точек и тел.

Доселе мы занимались кинематикой, не касаясь причин движения тел, то есть сил. А вот теперь коснемся.

Откуда вообще выводится релятивистская динамика?

Она является следствием тех же самых преобразований Лоренца.

Как из преобразований координат могут вытекать законы динамики? Из преобразований Галилея не следуют же законы Ньютона.

Но ведь мы строим не на пустом месте. Законы Ньютона никуда не деваются, они по-прежнему верны для малых скоростей – вот в чем все дело.

Логику можно представлять себе примерно так. Допустим, тело двигалось со скоростью v в некоторой «лабораторной» системе отсчета. В другой ИСО, где тело первоначально 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.

1) 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.

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

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

И что это такое?

Мы 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, масса едина и инвариантна (ну а формулы верны, конечно).

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!

А как же я читал про релятивистскую массу, которая равна $m_0\gamma$ (m_0 – масса покоя)?

Да, о зависимости массы от скорости написано во многих прежних книгах... Но по современным взглядам это не так.

Как это? Всегда считалось, что тело не может достичь скорости света, потому что масса стремится к бесконечности. А теперь что же – может?

Нет, результаты теории ничуть не меняются, просто сейчас несколько изменилась трактовка. Массу считают инвариантом, термин «масса покоя» устарел. Мы к этому скоро вернемся.

Как я замечаю, вы молча 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. Это опять 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 фундаментальные свойства пространства (его однородность).

Импульс в обычной механике это $p = mv \dots$

В СТО он выражается иначе.

Но ведь импульс вводится определением, чем же не устраивает такое?

Тем, что так 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 оттолкнулись, 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!

Релятивистский импульс определяют через 4-скорость (вместо обычной скорости),

и в результате он выглядит так: $\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m\mathbf{v}\gamma$. Здесь подобных парадоксов нет (ну а

для малых скоростей получается знакомое выражение). Стоит отметить, что при переходе к другой системе отсчета изменяется только составляющая импульса, направленная по вектору взаимной скорости.

Импульс, энергия и масса

Вы упоминали про какой-то 4-вектор энергии-импульса...

Да, компонентами его являются составляющие релятивистского импульса. И так называемая **полная энергия**.

Но сначала рассмотрим обычную кинетическую энергию тела. Она получается интегрированием – как работа силы. Несложные выкладки дают: $T = mc^2\gamma - mc^2$ (при $v \ll c$

получится известное $mv^2/2$). Формула подталкивает к некоторым обобщениям, их мы и обсудим.

Я замечаю, что тут фигурирует знаменитое эйнштейновское mc^2 .

Эта интригующая формула физикам начала XX века была знакома и до Эйнштейна. На рубеже двух веков на этой площадке теснились лучшие умы. Так, формулы для продольной и поперечной масс впервые получил Лоренц. Электродинамика дала выражение для импульса волны: $p = E/c$ (E – энергия), и считая, что $p = mv = mc$, приходим к знакомому: $E = mc^2$.

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 $E = mc^2$ выражает универсальное свойство любой материи.

С этим можно вернуться к формуле для кинетической энергии, в которой как раз и обнаруживается разность: полной энергии тела mc^2 и его энергии покоя mc^2 .

Отсюда когда-то родилась идея **релятивистской массы** $m\gamma$.

Вы сказали: «вроде бы»; разве что-то не так?

Почти все так, за некоторыми исключениями.

1) Для фотона $E = mc^2$ неверно, так как исходит из нерелятивистского соотношения для импульса. Фотон не имеет массы.

2) Понятия релятивистской массы $m\gamma$ сейчас избегают, а между массой и массой покоя не делают различий.

Я об этом слышал; упоминают статью академика Окуня. Но разночтение в массах мне кажется абсурдом. Разве вопрос не в том, что такое масса на самом деле, в раскрытии ее сущности?

Подобные взгляды проистекают из непонимания, что такое **определение** в науке. Суть определения в том, что некоторому понятию (содержательно описанному) присваивают термин, т.е. просто слово, для краткости. Что выглядит схематически так: <термин> это <понятие>.

Нередко термин имеет еще и второй, обиходный смысл. Отсюда возникает ложное представление, что само слово как бы наличествует объективно. А определение «раскрывает его сущность». То есть, что главное в определении стоит слева, а не справа.

И, таким образом, с определением можно «соглашаться», или, наоборот, предложить более адекватное...

Все это плод недоразумения.

Понимаю, вы хотите сказать: что считать массой – дело простой договоренности.

Да. И оперирование релятивистской массой это дело вкуса. Но все-таки отказ от нее связан для физиков с некоторой причиной, которая, быть может, не каждому покажется убедительной...

Интересно – с какой?

Уже говорилось, что физические законы принимают фундаментальный вид в четырехмерной **тензорной** форме (релятивистская динамика тоже имеет такое уравнение). Все величины, входящие в уравнения, должны быть **тензорами**. Например, 4-векторами (тензор первого ранга). Или скалярами (тензор нулевого ранга).

Но скалярами не в школьном понимании: если не вектор, значит, скаляр... Тензор нулевого ранга обязан быть инвариантом. Значит, в фундаментальные законы может входить только инвариантная масса.

А неинвариантная релятивистская масса (или полная энергия – что одно и то же, различие только в множителе c^2) вправе занимать лишь скромное место одной из компонент 4-вектора энергии-импульса, не фигурируя в законах самостоятельно.

Все это для меня сложно. Но я заинтригован: что это за фундаментальное тензорное уравнение динамики?

Пожалуйста, вот оно:

$$P = mc.$$

Здесь P это «длина» 4-вектора энергии-импульса.

Как, и это все? Вы, наверно, шутите.

Нисколько. Выражая длину через «теорему Пифагора» для псевдоевклидова пространства, получаем: $(E/c)^2 - p^2 = (mc)^2$ – основное уравнение динамики в «трехмерной» форме. Напоминаю, E – это полная энергия, для массивного тела – сумма энергии покоя и кинетической.

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

Эти два универсальных соотношения равно действительны 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.

Формула Эйнштейна

А что же все-таки с массой фотона?

Для фотона $v = c$; из формул получается, что масса равна нулю. Частицы, движущиеся со скоростью света, не имеют массы. И наоборот, безмассовые частицы могут двигаться только со скоростью света.

Тем не менее, волна обладает энергией и импульсом! И они зависят от движения источника.

Вы говорили, что это вроде бы не противоречит второму постулату...

Так и есть.

Энергия и импульс аддитивны, но инвариантная масса не аддитивна: масса системы не обязательно равна сумме масс составляющих! Правда, если пользоваться устаревшим понятием релятивистской массы, то вот она-то аддитивна, поскольку представляет собой энергию.

Странно, что масса может быть не аддитивна: ведь это как бы количество вещества.

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

А как же формула Эйнштейна: $E = mc^2$? С ростом скорости растет энергия E , значит, должна расти и масса. Эквивалентность массы и энергии...

Такой формулы нет. Есть формула $E_0 = mc^2$ – для энергии покоя.

Хорошо, но все-таки получается, что тело вместе с массой содержит и энергию? Хотя я слышал и другую версию: что согласно этой формуле масса переходит в энергию...

Знаете, вокруг знаменитой формулы много нелепых суждений. А смысл ее прост: она выражает законы сохранения при взаимопревращениях между массивными частицами и безмассовыми (то есть полями).

Так, масса системы, состоящей из двух одинаковых световых волн, движущихся в противоположные стороны, уже ненулевая...

Как это так?

Элементарно: импульс такой системы равен нулю, а энергия не ноль (как сумма энергий). Значит, соотношение для безмассовой материи: $p = E/c$ – не выполняется. Мы имеем дело как бы с массивной покоящейся частицей, внутри которой скрыта энергия волн. Энергия покоя может высвободиться при превращении массы в излучение (полностью или частично).

Знаменитая формула дает выражение для массы системы через скрытую внутри энергию. Она работает всегда, когда имеется переход от вещества к полю и обратно.

Можно ли считать, что каждой энергии соответствует масса, в соответствии с формулой?

Нет, это неправильно. Потому что, кроме энергии покоя, есть другие виды энергии.

А вот обратное верно: каждой массе соответствует энергия покоя (часть полной энергии).

СТО и кванты

Вроде бы тема квантов не относится к СТО.

Отчасти она связана, и сейчас мы это покажем.

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

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

Да, только добавим: отрезок монохроматической волны.

Пусть в упругой среде движется такой волновой пакет с известной энергией. Как вы считаете: энергия пакета меняется в зависимости от того, какой ИСО пользуемся?

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

Вы совершенно правы. Конечно, сама масса вещественной среды имеет кинетическую энергию, зависящую от того, какую систему отсчета избрать. Но если энергию среды 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 – помните? E/c^2 преобразуется как время, а импульс – как ко-

ордината. Выкладки дают: $E' = E \frac{1 \pm v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$. Плюс или минус – в зависимости от того, движется ли новая ИСО навстречу пакету, либо пакет догоняет ее.

Преобразования Лоренца применяются к энергии электромагнитных волн? Я-то считал, что все это относится к энергии и импульсу тел, частиц...

Как уже говорилось, СТО объединяет вещество и поле, в этом ее сила. Преобразования Лоренца это просто формулы пересчета координат; математике безразлично, координаты **чего** пересчитывать.

Но из того, что формулы СТО общие, следует, что при определенных условиях волна может быть эквивалентна частице, эту идею и предстоит развить.

Между прочим, инвариантность энергии пакета как раз и является показателем того, что электромагнитная волна не есть возмущение какой-то среды, а самостоятельная материя.

Кстати, и энергия частицы меняется при смене ИСО.

Она тоже возрастает, если новая ИСО как бы движется ей навстречу! И наоборот.

Вы верно подметили.

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

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

В разных ИСО будет различной частота волн (эффект Доплера), соответственно будет меняться длительность пакета (ведь число волн это инвариант).

Итак, для волнового пакета можно записать:

$$E = AF, \text{ где } A \text{ это некоторый коэффициент.}$$

Энергия пропорциональна частоте? В электротехнике, электродинамике энергия зависит от чего угодно, но только не от частоты.

Вспомните: речь идет об энергии одного и того же пакета, только в разных ИСО. Зависимость от частоты появляется из того, что при движении навстречу волне еще и растет амплитуда: как бы сжимается «гармошка».

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

Знаю: квант.

В таком случае, это порция чего? Какой именно величины?

Энергии, наверное...

Нет, не подходит: энергия не инвариант. Если мы движемся в том же направлении, в котором распространяется квант, его энергия для нас может быть меньше любого заданного размера.

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

Понял: тот самый коэффициент A !

Ну, конечно.

Если существует в природе наименьший волновой пакет, его фундаментальной характеристикой должно быть отношение E/F . И такая величина действительно есть.

Знаю: постоянная Планка.

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

Ускорители частиц

Я слышал, 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 появиться еще энергия?

Вы просто не учитываете, что есть еще и закон сохранения импульса.

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

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

$$(E/c)^2 - p^2 = (mc)^2.$$

Запишем его, как часто делают, принимая $c = 1$:

$$E^2 - p^2 = m^2.$$

Для ультрарелятивистских частиц $E \gg m$, а значит, энергия – это практически только импульс. Подавляющая часть энергии разогнанной частицы перейдет в кинетическую энергию продуктов столкновения, то есть, будет использована неэффективно.

При столкновении встречных пучков такой эффект исключается.

Электродинамика

Боюсь, что тема электродинамики для меня сложна.

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

Кстати: что это за пресловутая «нековариантность» законов электродинамики относительно преобразований Галилея?

Мы разберем вопрос на примере. Имеем прямолинейный провод с током, он создает вокруг себя магнитное поле. Находящийся поблизости покоящийся заряд не будет испытывать воздействия (проводник электрически нейтрален).

Пусть теперь заряд движется со скоростью v параллельно проводу. На заряд будет действовать сила...

Знаю: сила Лоренца, возникающая при движении заряда в магнитном поле.

Эта сила перпендикулярна вектору скорости заряда. В зависимости от условий, она будет направлена либо к проводнику, либо от него:



А теперь – внимание! Перенесемся в сопутствующую СО нашего заряда; в ней он неподвижен, а движется проводник. Но сила-то наличествует! Физике достоверно известно, что на неподвижный заряд магнитное поле не действует, только электрическое; но откуда оно могло вдруг взяться?

Не знаю...

Вот вы и поняли, о какой «нековариантности» идет речь.

Догадываюсь, что преобразования Лоренца все объясняют.

Это так. Следите за мной: провод это положительные и отрицательные заряды. Первоначально положительные заряды неподвижны, а электроны перемещаются со скоростью дрейфа w .

При переходе к новой ИСО провод движется, и все заряды получили приращение скорости.

Равное v .

Да, если пользоваться преобразованиями Галилея. Результирующая величина тока не изменится. И вообще ничего не изменится, так что непонятно, откуда могла бы явиться кулоновская сила.

Но мы воспользуемся СТО. Положительные заряды, ранее неподвижные, теперь приобрели скорость v . Ну а электроны, имевшие в первоначальной ИСО некоторую скорость дрейфа w ?

Понял: мы должны взять релятивистскую формулу для скоростей.

Ну, конечно. И вот первое следствие: ток неинвариантен, его величина в новой ИСО изменится. Это можно было предвидеть: вектор тока (как любой вектор) не может быть инвариантным, он – часть 4-вектора.

Тогда что является четвертой его составляющей?

Плотность заряда. В чем мы сейчас и убедимся.

Разные скорости цепочек положительных и отрицательных зарядов приведут к их неодинаковому релятивистскому сжатию на единицу длины. На каждом отрезке проводника они уже не будут компенсироваться – появится электрический заряд! Вот откуда берется электрическое поле.

Расчет с помощью преобразований Лоренца показывает, что все точно сходится.

Обратно, пусть имеем неподвижный заряженный провод. При переходе в другую ИСО те же релятивистские эффекты приведут к появлению силы, которая интерпретируется как действие магнитного поля.

Ловко... Но погодите, выходит, что магнитное поле это просто следствие релятивистских эффектов?

Так оно и есть. В каком-то смысле говорят, что СТО раскрывает природу магнитного поля.

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.

Все-таки объясните: уравнения Максвелла ковариантны относительно преобразований Лоренца? А то иногда говорят: да, но не в исходном виде, а исправленные, что ли.

Да, ковариантны. Но преобразования координат (и времени) по Лоренцу приводят к тому, что при переходе между ИСО изменяются физические величины. Скажем, электрический потенциал не инвариантен – в 4-мерной геометрии это не скаляр. А напряженность поля – даже и не вектор!

Это противоречит тому, что я изучал...

Значит, учителя щадили вашу психику.

Масса или заряд – скаляры, они инвариантны. А электрический потенциал меняется при смене системы отсчета.

В четырехмерной форме, напоминаю, 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 (электрическое; а магнитное это так называемый псевдовектор)... Но при переходе в другую ИСО (то есть при 4-мерном 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, их можно найти в литературе. То есть, при переходе в другую ИСО – поля следует пересчитывать. И тогда не придется больше рассматривать сжатие каких-то там цепочек зарядов.

Запаздывающие потенциалы

Я слышал о «запаздывающих потенциалах»...

Да, есть такой принцип, как раз применимый для рассмотрения полей движущихся зарядов. Суть его проста: в текущий момент времени t в некоторой точке действует поле, созданное зарядом в более ранний момент t' .

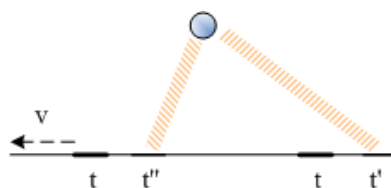
Все ясно: надо учесть запаздывание распространения поля от заряда до интересующей точки.

Именно так. Давайте, применим это к нашему движущемуся поступательно заряженному проводнику, который призван создавать поле.

Точку, поле в которой нас интересует, назовем **точкой наблюдения**.

Выделим, как и ранее, некоторый отрезок провода, пусть он движется по направлению к точке наблюдения. Ясно, что его текущее положение еще не «почувствовано» в

точке – поле же не распространяется мгновенно. До нее дошло только поле, созданное в более ранний момент t' . Отрезок был тогда в несколько другом месте:



Он был дальше от точки наблюдения.

Совершенно верно. То есть, поле в точке слабее, чем если бы мы (при равном расстоянии) рассматривали неподвижную задачу. Согласны?

Конечно. Мы похожее разбирали, говоря об относительности одновременности.

А напрасно... Но пойдем пока далее. Можем рассмотреть симметричный отрезок проводника, находящийся, наоборот, впереди – то есть удаляющийся. Аналогичные рассуждения покажут, что поле, создаваемое этим отрезком, наоборот, сильнее – в точке действует поле, созданное в момент t'' , когда заряд был к ней ближе.

Мне кажется все логичным: поле как бы сносится при движении заряженного тела. Не понимаю ваших намеков на ошибочность...

Меж тем абсурд налицо. Беря попарно симметричные отрезки спереди и сзади, мы обнаруживаем, что в целом движущийся заряженный провод действует полем всех своих отрезков несимметрично. К помещенному в точку наблюдения неподвижному заряду будет приложена сила, направленная преимущественно в одну сторону.

Ну, значит, таково действие движущегося заряженного провода...

Так что же – заряд будет самопроизвольно и неограниченно ускоряться? А в другой ИСО, в которой провод неподвижен, не будет?

Да, чепуха, опять вечный двигатель.

Потому что в наши рассуждения вкралась ошибка.

Вернемся назад: отрезок проводника движется в сторону точки наблюдения. И до нее как раз дошло поле, созданное им в более ранний момент t' ... в какой?

Рассуждаем: полю требовалось время, чтобы преодолеть расстояние от заряженного отрезка до точки. Вот на это время более ранний.

Логично... Но – расстояние-то не одно и то же. Пусть до точки долетело поле от «носа» нашего отрезка. Значит, от «хвоста» оно еще не успело дойти!

Точнее, до нашей точки дошло поле «хвоста» – но как бы уже другого отрезка, в другой, более ранний момент времени t'' , когда он был еще дальше. Ведь требуется больше времени, чтобы преодолеть добавочное расстояние, равное длине.

Итак, поле в момент t создается неким «виртуальным» отрезком провода, который состоит из кусочков реальных отрезков, относящихся к разным моментам времени! А в пространстве этот виртуальный отрезок имеет увеличенную длину. И потому несет больший заряд.

А удаляющиеся отрезки – наоборот, меньший.

Хм... Мне приходится лишь верить вам на слово.

Разумеется, полное понимание невозможно без формул, да и в них надо кропотливо разбираться.

Но если вы готовы допустить справедливость пояснений... то оказывается, что этим устраняется кажущаяся несимметрия поля. А формулы снова приводят к преобразованиям Лоренца!

Что же, никакого сноса поля нет?

Нет. И это легко получить другим путем. Мы говорили, что скалярный электрический потенциал – это временная компонента 4-вектора потенциала. При переходе в другую ИСО он должен меняться по общим правилам преобразования составляющих 4-векторов.

Рассмотрим аналогию: если мы переходим из ИСО, в которой пространственный промежуток между событиями ноль, в любую другую, то временной промежуток в этой ИСО увеличивается в соответствии с лоренц-фактором γ (замедление времени). Точно так же, если переходить из ИСО, в которой векторный потенциал ноль (заряд покоится) в другую, скалярный потенциал должен увеличиться в γ раз, вот и все.

Увеличиться где?

Хороший вопрос. В соответствующих точках четырехмерного пространства-времени.

Для неподвижного заряда, размерами которого можно пренебречь, поверхности одинаковых потенциалов представляют собой сферы – с центрами в точке заряда.

Это известно.

Перейдем в движущуюся ИСО, которая в момент $t = 0$ имеет то же начало координат, что и первая ИСО. Тогда поверхность заданного потенциала в этот момент будет сферой большего в γ раз диаметра... так?

Вроде бы...

На самом деле не совсем: надо учесть сокращение линейных масштабов в направлении движения – оно как раз равно $1/\gamma$. Получается, что мгновенное состояние поверхности равных потенциалов в движущейся ИСО имеет вид эллипсоида: поперек движения он вытянут, а диаметр в направлении движения тот же, что и для неподвижного случая. Очевидно, что эта поверхность движется, сопровождая заряд.

Если рассчитать электрическое поле, то оно будет также симметрично вперед и назад. И картина поля сплющена: с ростом скорости заряда поле вперед и назад уменьшается, но вытягивается в поперечных направлениях.

Странно, зачем бы ему сплющиваться?

Это как раз объяснимо. Смотрите: если движутся два заряда друг за другом, то дистанция между ними сжимается с ростом скорости. А сила взаимодействия по направлению движения неизменна, помните? Чтобы не было противоречия, поле должно соответственно ослабляться...

Похоже, я увлекся и нагородил того, что явно выходит за рамки популярного изложения. Значит, самое время подвести черту. Предоставив тому, кто по-настоящему заинтересовался, раскрыть учебники и разбираться далее самому.

А старт все-таки дан, я надеюсь!