# СТО

Со времени появления специальной теории относительности прошло уже больше 100 лет. Основой для теории стали уравнения Максвелла. При переходе от одной инерциальной системы к другой уравнения Максвелла меняют свой вид! Однако физика всегда искала всеобщие законы природы, которые никак не зависят от нас с вами – наблюдателей данной области Вселенной, хотя бы потому, что как мы сами движемся до конца неизвестно. Такое несоответствие привело к поиску линейных преобразований, подобных преобразованиям Галилея, которые бы оставляли уравнения Максвелла (и в первую очередь их следствия) неизменными. Такими преобразованиями стали преобразования Лоренца. Эйнштейн затем смог получить их из двух постулатов. Итак, начнём.

## Линейные преобразования, которые не меняют волнового уравнения

Требуется найти линейные преобразования, которые оставляют неизменным вид волнового уравнения:



Здесь следует отметить одну важную вещь – не меняется коэффициент в волновом уравнении. Линейные преобразования:



Найдём производные:



Подставляем в первое уравнение, сравниваем со вторым, откуда получаем систему из трёх уравнений, с четырьмя неизвестными:



Знаки могут быть любые, выберем их так, чтобы  и .

Для определённости выберем знак «+» в первом выражении и «–» во втором и посмотрим, как движется произвольная точка  в системе :



Таким образом, система  движется относительно  со скоростью:



Откуда



Преобразования при этом принимают привычный вид:



Если рассмотреть трёхмерное волновое уравнение и рассмотреть преобразования Лоренца без поворота координатных осей относительно друг друга, абсолютно аналогично добавятся два дополнительных условия:



## От постулатов Эйнштейна к преобразованиям Лоренца

Эйнштейн избавился от волновых уравнений, обобщив преобразования Лоренца на все физические законы, а не только на электродинамику. Он предположил, что они имеют более общую природу, и смог свести их к двум постулатам:

1. Все инерциальные системы эквивалентны, друг другу.
2. Скорость света не меняется при переходе от одной инерциальной системы к другой.

На самом деле их требуется дополнить свойствами инерциальных систем. Речь обычно идёт о первом законе Ньютона. Формулировки бывают разные. Вот, например, одна формулировка:

* Существуют такие системы отсчёта, называемые инерциальными, в которых тела движутся прямолинейно и равномерно, если на них не действуют другие тела.

Чудесная формулировка, в которой априорно предполагается, что мы с вами знаем, как это, когда одно тело действует на другое. При этом нигде не говорится, что все инерциальные системы движутся друг относительно друга с постоянной скоростью. Между тем, это есть самое важное и интересное свойство. Тем более что выбрать инерциальную систему среди множества систем вообще нельзя, так как силы инерции могут вполне оказаться силами гравитации и наоборот.

Выведем преобразования Лоренца из постулатов Эйнштейна. Первый способ мне нравится больше всего, он нередко встречается в книгах по общей физике. Второй – канонический путь, который часто встречается в книгах по теоретической физике.

### Первый способ

Рассмотрим световые часы. Они представляют собой два зеркала, укреплённых на жестком стержне длиной в покое. От одного зеркала до другого распространяется световой сигнал. Пусть часы движутся со скоростью , и стержень лежит в плоскости перпендикулярной скорости. В СО, связанной с часами, время, которое необходимо сигналу, для того чтобы пройти от одного зеркала до другого, обозначим , в неподвижной системе отсчёта – . Длину подвижного стержня в неподвижной системе обозначим . Будем считать, что при переходе от одной системы к другой:



Это легко обосновать. Выражения для перехода не должны зависеть от длины стержня. Устремляя длину стержня к нулю, получаем, что  и  – бесконечно-малые одного порядка малости. А они могут быть связаны только линейным законом. Перейдём теперь обратно:



 не может зависеть от знака скорости (меняя знак, можно зеркально отобразить все оси и ничего не поменяется), поэтому . Если  направлена вдоль , отсюда следует:



Далее найдём время необходимое свету, чтобы достичь зеркал. Свет распространяется по прямой, как показано на рисунке.



Данная формула выражает знаменитое замедление времени.

Пусть теперь стержень расположен параллельно скорости. Найдём длину подвижного стержня. Для этого рассчитаем время, которое требуется на прохождение от одного конца до другого и обратно, и умножим его на скорость света:



Отсюда:



Данная формула описывает сокращение длины. Теперь получим выражения для преобразования координаты  и времени. Рассмотрим подвижную точку как стержень с одним из концов в начале координат. Движение данной точки будет описываться уравнением:



В подвижной системе отсчёта . Откуда следует:



Для обратного перехода:



Отсюда следуют преобразования Лоренца:



### Второй способ

Он основан на представлении об инварианте. Постоянство скорости света приводит к тому, что волновой фронт остаётся сферическим в любой системе отсчёта. Уравнения волновой поверхности:



Пусть подвижная система, как и выше, движется со скоростью  вдоль оси . Будем считать, что новые оси  остаются параллельными старым осям. Преобразования линейные. Тогда для осей перпендикулярных скорости:



Для обратных преобразований получаем:



Однако, выполняя зеркальные преобразования осей, получаем, что :



Теперь, как и выше будем искать преобразования вида:



Из инвариантности получаем систему:



И всё в точности, как для волновых уравнений.

## Преобразование при произвольной скорости движения СО

Пусть система отсчёта движется с произвольной скоростью . Представим радиус-вектор в виде:



Получаем:





Особый интерес представляет модуль вектора :



## Преобразование скоростей

Пусть в одной системе отсчёта частица движется со скоростью , найдём скорость её движения в системе, движущейся относительно первой со скоростью  вдоль оси . Всё просто:







В случае произвольного направления движения СО:



## Преобразование ускорений

Пусть в одной системе отсчёта частица движется со скоростью и ускорением , найдём ускорение в системе, движущейся относительно первой со скоростью  вдоль оси . Сразу в векторном виде:



## Толика безумия

Мы уже познакомились с преобразованиями Лоренца. Количество многоэтажных выражений зашкалило и пора немного поболтать. Попробуем посмотреть, что будет происходить в некоторых предельных случаях. Тривиальный случай, когда новая система неподвижна неинтересен. Попробуем устремить скорость системы к скорости света и подумаем над двумя вещами.

Первое – что будет происходить с такими объектами для покоящегося наблюдателя в первой системе? Здесь всё просто. Если объект, который мы разгоняем до скорости света, имел длину, то она для наблюдателя в первой системе отсчёта устремиться к нулю. Проще говоря, мы никогда не сможем измерить размер объекта вдоль направления его движения, все объекты будут казаться плоскими. Если же, например, в объекте протекают химические реакции, то для нас там ничего не будет протекать. Вообще говоря, это связано с тем, что нет такого эксперимента, который бы позволил узнать, что происходит в системе. Наши лучи света никогда объект не догонят. Второе – что будет происходить с точки зрения наблюдателя движущегося со скоростью света. Для него ничего не укорачивается, объект имеет длину, процессы не стоят на месте, но вот все окружающие объекты выглядят плоскими. Именно таким будет мир, если учитывать только соотношения выше, то есть если не привлекать динамику и теорию гравитации.

Перейдём теперь в систему, которая движется с бесконечно большой скоростью. Преобразования Лоренца и скоростей дают:



Появилась мнимая единица. Перейдём теперь из этой системы в систему, движущуюся со скоростью  большей скорости света:



Здесь есть лишь одна важная деталь: пространство и время в ходе таких рассуждений поменялись местами, но для этого потребовалось пройти через бесконечности и мнимые единицы. При этом следует отметить, что система, тем не менее, описывает реальные частицы. Пытливый ум тут же догадается, что выписаны всё те же преобразования Лоренца, и нужно только увидеть, чему соответствует скорость  в первой системе отсчёта.

## Масса

Задумаемся над тем, как именно мы её определяем. Берём одно тело в качестве эталона, стержень. Помещаем стержень в однородное поле (на наше счастье на планете Земля есть сила тяжести), находим его центр тяжести и закрепляем таким образом, что стержень неподвижен. Теперь к концу одного стержня подвешиваем тело-эталон, к другому концу тело, массу которого ищем. Не уравновесилось? Выбираем много одинаковых тел эталонов поменьше, уравновешивающих друг друга, и ищем диапазон, в котором лежит масса искомого тела. Процесс повторяется до тех пор, пока мы сами не сочтём результат приемлемым или не сможем выбрать эталон поменьше.

Понятно, что для лучшего результата весы должны быть как можно меньше.

Понятно, что лучше будет, если стержень невесом, а точка подвеса именно точка (правда в последнем случае наличие даже малейшей неоднородности поля будет приводить, к тому, что уравновешенные весы, тут же перестанут быть таковыми).

А как быть, если мы не знаем однородно поле или нет? Для этого уравновесим весы в одном месте, а затем перенесём их в другое место. Повезло и весы по-прежнему уравновешены? Что ж поздравляю, но это ничего не значит. Чтобы утверждать, что поле однородно нужно ещё их повращать, в самых разных местах. Повращали – весы неподвижны? Радуйтесь и пляшите поле более-менее однородно, и вы можете измерять массу.

Теперь требуется придумать такие весы, для которых эталон неподвижен, а тело массу которого мы ищем подвижно. Рассмотрим систему, приведённую на рисунке:



Данная система уравновешена в каждый момент времени. Перейдём из неё в систему, движущуюся со скоростью :



Мы видим всего лишь слепок при постоянном времени:



Тогда:



Учтём, что:





Закон Архимеда если бы он действовал, привёл бы нас к соотношению между массами:



В результате, масса движущегося объекта  отличалась бы от массы неподвижного объекта  и с ростом скорости первого объекта также бы возрастала. Однако здесь следует отметить, что в данных весах роль передающего механизма играл стержень, и предполагалось, что скорость передачи силовых взаимодействий по нему бесконечна. Возможно, именно с этим связано расхождение с СТО. Второй вариант – неприменим закон Архимеда. Но как тогда определять массу?

## Энергия, импульс

Представления СТО о пространстве-времени приводят к тому, что закон сохранения импульса в классической форме перестаёт выполняться. Можно было идти двумя путями. Первый путь состоял в том, чтобы отказаться от законов сохранения в их классической форме. К чему пришла бы физика по этому пути неизвестно, но это бы не отменило её развития. История сделала выбор в пользу отказа от классического определения импульса. Существует несколько путей введения понятий об импульсе и энергии в специальной теории относительности.