

Преобразования пространства-времени и принцип причинности

A.N. Smirnov

andreysxxx@gmail.com

Аннотация

Детально рассмотрено применение принципа причинности к инерциальным системам отсчета. Было обнаружено, что наблюдатель имеет только ту информацию, которую имеет та ИСО, относительно которой он неподвижен. Дальнейший анализ привел к выводу, что с точки зрения наблюдателя события в разных ИСО выглядят одинаковыми, даже при наличии фактической разницы в событиях. Делать какие-либо предположения при этом не потребовалось.

Этот результат привел к гипотезе о том, что принцип причинности применяется отдельно и независимо для каждой отдельной ИСО.

Такая гипотеза приводит к тому, что возникает два типа преобразований при переходе между инерциальными системами отсчета. Первое это преобразования с точки зрения наблюдателя. Второй тип преобразований является новым типом преобразований, это прямые преобразования пространства-времени и полей.

Из постулатов гипотезы была получена специальная теория относительности, как преобразования пространства-времени с точки зрения наблюдателя. Внесения каких-либо изменений в уравнения СТО не потребовалось. Эту гипотезу можно рассматривать как обобщение специальной теории относительности для случая, когда принцип причинности применяется отдельно и независимо для каждой отличающейся инерциальной системы отсчета.

Введение

Имеется много попыток создания обобщений специальной теории относительности. Наверное, самое известное и самое успешное такое обобщение, это общая теория относительности. Общая теория относительности обобщает специальную теорию относительности для искривленного пространства-времени, и переходит в специальную теорию относительности (СТО) в плоском пространстве-времени. Помимо общей теории относительности, имеется много других обобщений СТО для искривленного пространства-времени.

Обобщения СТО строятся следующим образом: что-то меняется, но постулаты СТО остаются без изменений. Для случая ОТО плоское пространство меняется на искривленное пространство. При стремлении кривизны пространства-времени к нулю ОТО, как известно, переходит в СТО.

Для случая плоского пространства-времени известных обобщений СТО нет. Имеются попытки модифицировать СТО для плоского пространства-времени. Например, Doubly special relativity [1] добавляет некоторые дополнительные ограничения, такие как максимальная энергия.

Модификации СТО, в отличие от обобщений, нарушают уравнения СТО, нарушают Лоренц-инвариантность.

Специальная теория относительности является одной из самых проверенных теорий в истории науки. Поиск нарушений Лоренц-инвариантности [2-4] ведет к повышению точности экспериментов и уменьшению пространства для попыток модификации СТО.

Возможно, СТО точно описывает преобразования для плоского пространства-времени. Если это верно, означает ли это, что невозможно построить преобразования плоского пространства времени, не нарушающие Лоренц-инвариантность, но на основе несколько отличающейся системы постулатов, включающей постулаты СТО, и приводящие к отличающимся уравнениям? Как известно, преобразования СТО однозначно следуют из постулатов СТО. Можно попробовать добавить новый постулат, но он либо войдет в противоречие с существующими постулатами, либо

сделает теорию некоторым частным случаем СТО. Остается единственная возможность – это найти обобщение СТО для плоского пространства-времени. Обобщения СТО для искривленного пространства-времени переходят в СТО при стремлении кривизны пространства-времени к нулю. Обобщения СТО для плоского пространства-времени должны переходить к СТО при стремлении чего-то к тому, что ожидает СТО.

Поиск возможности для такого обобщения. Постулаты СТО считаем верными, их не пытаемся модифицировать. Тогда остается только поиск какого-то неявного постулата СТО, который принят а priori, без экспериментального подтверждения. После чего, нужно будет найти возможность его модификации. При этом, так как явные постулаты СТО не меняются, то новая обобщенная теория будет переходить в СТО при стремлении к нулю отличия неявного постулата СТО от его модификации.

Очевидно, что это может быть только какой-то очень фундаментальный постулат, который воспринимается как очевидный без доказательств и без экспериментальной проверки, и который никогда ранее не подвергался сомнению. Такой неявный постулат в СТО виден, это принцип причинности.

Целью данной работы является предложить обобщение специальной теории относительности для плоского пространства-времени. Обобщение предлагается при помощи модификации принципа причинности.

Далее мы рассматриваем только пространство-время, не имеющее кривизны. Рассматриваем только инерциальные системы отсчета.

1. Принцип причинности

Рассмотрим принцип причинности. Принцип причинности говорит, что любое событие чем-то вызвано, имеет причину. В классической физике по предыдущему состоянию системы возможно однозначно найти состояние системы в любой последующий момент времени. В квантовой физике состояние системы обычно описывается волновыми функциями. Принцип причинности позволяет, зная состояние системы в какой-то момент времени, найти состояние системы в любой последующий момент времени. Это можно записать так:

$$\varphi(t + dt) = A\varphi(t) \tag{1}$$

Здесь φ – состояние системы, t – время, A – некоторый оператор. Состояние системы φ включает в себя то множество значений, которое необходимо для описания системы. Например, для описания системы тел на основе закона всемирного притяжения Ньютона, если рассматривать тела как материальные точки, для описания состояния достаточно масс, скоростей и координат тел. Соответственно, значение должно состоять из массы, вектора скорости и координат тела. Для описания квантово-механической системы, необходимы значения квантовых полей в каждой точке.

Какие-то события не могут влиять на другие события, так как они разделены пространственно-подобным интервалом. В квантовой физике, это выражается как отсутствие корреляции результатов измерений в точках, разделённых пространственно-подобным интервалом. Имеются другие ограничения для других формулировок, например условие микро-причинности Боголюбова [Ссылка]. Подобные ограничения можно рассматривать как дополнительные ограничения на оператор A . Для целей данной гипотезы, как эти ограничения, так и какие-то детальные свойства оператора A не важны и рассматриваться не будут. Важно только то, что имеется некоторый оператор A , с какими-то свойствами, который переводит систему из состояния в момент времени t в состояние в момент времени $t + dt$.

Можно отметить, что одного только уравнения 1 для принципа причинности недостаточно. Допустим, мы знаем состояние системы в некоторой инерциальной системе отсчета (ИСО).

Обозначим эту ИСО как L . Можно ли на основе этого найти состояние системы в другой ИСО, L' , двигающейся с ненулевой скоростью относительно L ? Если это невозможно, то события в разных ИСО невозможно связать между собой. Однако, практика применения принципа причинности в современных физических теориях подразумевает, что, зная состояние системы в одной ИСО, можно получить состояние системы в другой ИСО. Таким образом, для выполнения принципа причинности должно выполняться еще и следующее уравнение, для каждого φ'_i и t'_i

$$\begin{cases} \varphi'_i(L') = B_{\varphi i} \varphi(L) \\ t'_i(L') = B_t t_i(L) \end{cases} \quad (2)$$

Здесь φ'_i - одно из множества состояний в ИСО L' , t_i - время в L для φ_i , i -го элемента множества φ , t'_i - соответствующее время в L' , $B_{\varphi i}$ - некоторый оператор, переводящий состояние системы из одной ИСО L в другую ИСО L' для φ_i , B_t - оператор, переводящий время из ИСО L в ИСО L' . Свойства этих операторов мы здесь пока не рассматриваем.

Преобразование выше обычно записывают чуть иначе. Для нахождения состояния в некоторой точке пространства-времени в одной ИСО, обычно берут состояние в другой ИСО в некоторой точке пространства-времени. Уравнение 2 включает такое описание как частный случай, когда φ'_i зависит не от всех состояний в L , а только от состояния в некоторой точке.

В случае, если две ИСО имеют нулевую относительную скорость, отличаются началом координат или ориентацией осей, то простым преобразованием можно перевести одну ИСО в другую. Чтобы исключить из рассмотрения такие преобразования, далее будем рассматривать только отличающиеся ИСО. Для наших целей, определим, что две ИСО отличаются, если они имеют ненулевую относительную скорость.

Теперь вновь взглянем на уравнение 1. Хочется отделить преобразование состояния между ИСО от изменения состояния во времени. Изменим уравнение на следующее:

$$\varphi(t + dt, L) = A\varphi(t, L) \quad (3)$$

Теперь $\varphi(t, L)$ обозначает состояние системы не просто в момент времени t , а еще и в некоторой ИСО L . Оператор A , соответственно, переводит состояние системы между разными моментами времени в одной и той же ИСО.

Тогда, для выполнения принципа причинности необходимо выполнение одновременно двух уравнений, 2 и 3, что приводит к системе уравнений:

$$\begin{cases} \varphi(t + dt, L) = A\varphi(t, L) \\ \varphi'_i(L') = B_{\varphi i} \varphi(L) \\ t'_i(L') = B_t t_i(L) \end{cases} \quad (4)$$

Уравнение 1 позволяет описать принцип причинности, когда мы не рассматриваем детально свойства преобразований между ИСО. Уравнение 4 нужно для более детального анализа того, как связаны принцип причинности и преобразования между ИСО.

2. Принцип причинности и наблюдатель

Рассмотрим пространство-время, с некоторыми полями, содержащее наблюдателя.

Наблюдателем может быть как некоторый прибор, так и разумное существо. Считаем, что в этом пространстве-времени выполняется принцип причинности.

В специальной теории относительности событие это точка в пространстве-времени, и оно отличается от события в принципе причинности. Далее событие будет означать событие, которое описывается принципом причинности.

Рассмотрим следующий вопрос. Может ли рассматриваемое пространство-время содержать причинно-следственные связи, начинающиеся от события, которое не происходило в этом пространстве-времени?

Событие в принципе причинности определено довольно размыто. Примером события может быть столкновение двух тел. Неважно, являются ли это элементарные частицы, описываемые квантовой физикой или какие-то большие тела. Важно то, что, согласно устоявшимся в физике взглядам, если событие, столкновение двух тел как пример, произошло в одной ИСО, то оно происходит во всех ИСО. Это означает, что уравнение 2, преобразование состояния между ИСО, должно сохранять события. У события, после преобразования, могут меняться какие-то свойства, могут меняться пространственно-временные расстояния с другими событиями, но само событие происходит во всех ИСО.

Причинно-следственные связи, начинающиеся от события, которое не происходило в этом пространстве-времени, можно описать как множество состояний в некоторый момент времени t в некоторой ИСО, которые не следуют из множества состояний в момент времени t_0 . То есть, множество состояний $\varphi'(t)$ содержит такие состояния, которые не входят во множество $\varphi(t)$, где $\varphi(t)$ удовлетворяют уравнению 3 и получается от состояния в момент времени t_0 . Очевидно, что это противоречит уравнению 3, и поэтому невозможно. Ожидаемый результат, потому что иначе бы это очевидно нарушало бы принцип причинности.

Наблюдатель может иметь только ту информацию о событиях, которая имеется в пространстве-времени. Поэтому наблюдатель не может иметь информации о событии, которое не происходило в этом пространстве-времени.

Теперь рассмотрим наблюдателя и наблюдение. Наблюдатель всегда наблюдает только в одной ИСО – той, относительно которой он неподвижен. Наблюдатель может получать информацию от других наблюдателей, но получает он ее всегда в своей ИСО. Поэтому, наблюдатель может иметь только ту информацию о событиях, которая имеется в его ИСО, относительно которой он неподвижен.

Делаем вывод: Наблюдатель не может иметь информации о событии, которое не происходило в его ИСО.

Это один из важных выводов гипотезы, который далее будет использован для обобщения СТО.

Предположим, что уравнение 2 не сохраняет события при переходе между ИСО или вообще не выполняется, уравнение 3 выполняется. Тогда, событие может существовать в некотором множестве ИСО и не существовать в другом множестве ИСО. Рассмотрим, как это будет воспринимать наблюдатель, будут ли отличаться события между ИСО с точки зрения наблюдателя. Для наших целей, мы считаем, что если какое-то событие существует во всех рассматриваемых ИСО, то это событие между ИСО не отличается, даже если какие-то свойства события меняются.

Наблюдатель может получать информацию о том, что происходит в других ИСО, двумя способами. Первый способ, это получение сигнала с информацией от наблюдателя, который покоится относительно другой ИСО, двигающейся с ненулевой скоростью относительно первого наблюдателя. Второй способ, наблюдатель может изменить свою скорость и перейти в другую ИСО. Рассмотрим, для каждого из вариантов, как при этом будут выглядеть события с точки зрения наблюдателя.

Рассмотрим первый способ. Пусть имеется ИСО L и ИСО L' , двигающиеся с ненулевой скоростью относительно друг друга. В ИСО L пусть имеется наблюдатель 1, неподвижный относительно нее. В L' имеется наблюдатель 2, неподвижный относительно этой ИСО. Наблюдатели 1 и 2

обмениваются информацией о том, что они наблюдают. Пусть сигнал, посылаемый каждым из наблюдателей, содержит информацию о событии, которое есть в ИСО того наблюдателя, что посылает сигнал, но нет в ИСО принимающего наблюдателя. Может ли принимающий наблюдатель получить информацию о событии, которого нет у него в ИСО? Эту информацию можно описать как некоторый набор причинно-следственных связей, начинающихся от события, которого в данной ИСО не было. Или, иначе, как множество состояний системы, которое не удовлетворяет уравнению 3. Как было рассмотрено выше, это невозможно. Поэтому, неважно что посылает другой наблюдатель, для принимающего наблюдателя получаемый сигнал не может входить в противоречие с принципом причинности и уравнением 3.

Теперь рассмотрим второй способ. Наблюдатель что-то наблюдал, сохранил результаты своих наблюдений на многочисленных инструментах. После чего, наблюдатель изменяет свою скорость и начинает иметь нулевую скорость относительно другой ИСО. Может ли наблюдатель обнаружить, что в новой ИСО отсутствуют какие-то события, которые были в предыдущей ИСО? Снова, эту информацию можно описать как некоторый набор причинно-следственных связей, начинающихся от события, которого в данной ИСО не было. Или, иначе, как множество состояний системы, которое не удовлетворяет уравнению 3. Как было рассмотрено выше, это невозможно. Теперь рассмотрим, может ли наблюдатель обнаружить, что в его новой ИСО есть какие-то события, которых не было в предыдущей ИСО. Для этого, наблюдателю как-то нужно иметь возможность узнать, было ли такое событие в предыдущей ИСО. То есть, нужно найти причинно-следственные связи, которые отсутствуют в предыдущей ИСО и имеются в новой ИСО. Или, иначе, найти множество состояний из уравнений 3, которые имеются в новой ИСО и отсутствуют в предыдущей. В новой ИСО такой информации нет. Получить ее из другой ИСО невозможно, как было рассмотрено выше. Получение такой информации означало бы, что такая информация появилась в ИСО, при этом ее там не может быть. Поэтому делаем вывод, что наблюдатель не может обнаружить что в его новой ИСО отсутствуют какие-то события, которые были в его предыдущей ИСО.

Под одинаковостью событий мы обозначаем, что если какое-то событие произошло в одной ИСО, то оно произошло во всех ИСО. Тут мы не утверждаем, что свойства любого события одинаковы во всех ИСО.

Поэтому, приходим к выводу, что с точки зрения наблюдателя, события одинаковы во всех ИСО, даже при их фактическом отличии из-за того, что уравнение 2 не сохраняет события при переходе между ИСО или вообще не выполняется.

Это ключевой результат для гипотезы, на котором и построено обобщение СТО.

Определим, что такое применение принципа причинности независимо и отдельно для каждой отличающейся ИСО. Считаем, что принцип причинности применяется отдельно и независимо для каждой отличающейся ИСО, если выполняется уравнение 3, а уравнение 2 не сохраняет события при переходе между ИСО. Отметим, что частным случаем несохранения событий при переходе между ИСО является случай, когда уравнения 2 вообще не выполняются, то есть на основании состояния системы в одной ИСО невозможно определить состояние системы в другой ИСО.

На основе сделанных выше выводов, получается, что принцип причинности можно применять как к пространству-времени в целом, так и независимо для каждой отдельной ИСО. Даже если события, описываемые принципом причинности, будут различаться в разных ИСО, с точки зрения наблюдателя события в разных ИСО будут одинаковыми.

Здесь мы описали основное предположение гипотезы: принцип причинности применяется отдельно и независимо для каждой отличающейся инерциальной системы отсчета. Получен ключевой результат для обобщения СТО:.. Неважно, отличаются ли события в разных ИСО или нет, но для наблюдателя всегда будет выглядеть так, что события во всех ИСО одинаковые. Отдельно отметим, что этот результат возникает при детальном анализе применения принципа причинности, без каких-либо дополнительных предположений.

3. Применение принципа причинности и существование человека

Предположим, что поля в разных инерциальных системах отсчета, имеющих ненулевую скорость относительно друг друга, полностью независимы. При ускорении или замедлении, мы переходили бы в другую систему отсчета, поля в которой были бы полностью независимы от предшествующей. В этом случае, если в одной из ИСО имеется человек, то нет никаких оснований для того, чтобы он был в любой другой ИСО. Тем самым, человек мог бы существовать только в одной ИСО, и исчезал бы при изменении своей скорости. Но это очевидно противоречит повседневному опыту - при изменении скорости, наше сознание остается непрерывным, тело продолжает существовать. Исходя из этого, должно существовать ограничение на то, насколько отличаются поля и, соответственно, события в разных системах отсчета.

Предположим, что при стремлении относительной скорости инерциальных систем отсчета относительно друг друга к нулю, разница между применением принципа причинности одновременно к обоим ИСО и отдельно для каждой ИСО должна стремиться к нулю. В этом случае появляется некоторая зависимость полей, находящихся в разных инерциальных системах отсчета, друг от друга. При достаточно малой разнице скорости между системами отсчета, изменение скорости человеком не будет приводить к его исчезновению в той системе отсчета, которая стала его новой системой отсчета с нулевой относительной скоростью. Это условие является необходимым для существования человека.

Это можно переформулировать через принцип причинности: при стремлении относительной скорости двух инерциальных систем отсчета к нулю, разница между применением принципа причинности отдельно для каждой из этих ИСО с применением принципа причинности одновременно к обоим ИСО должна стремиться к нулю. Это еще один постулат гипотезы, дополнительный к основному предположению.

4. Типы преобразований пространства-времени

Рассмотрим преобразования пространства-времени и полей, возникающие на основе основного предположения гипотезы.

Можно заметить, что с точки зрения наблюдателя, каждое событие существует во всех ИСО, принцип причинности связывает события во всех ИСО. При этом, фактически события могут различаться, некоторые события могут существовать в одной ИСО и отсутствовать в другой. Поэтому тут можно выделить два типа преобразований.

Первый тип, это преобразования пространства-времени и полей на основе полей, наблюдаемых в разных инерциальных системах отсчета наблюдателями, неподвижными относительно соответствующих инерциальных систем отсчета.

Второй тип преобразований, это преобразования пространства-времени и полей с точки зрения наблюдателя. Наблюдатель может быть неподвижен относительно одной из инерциальных систем отсчета, он может менять свою скорость, но, согласно результатам выше, для него любое событие выглядит как существующее во всех ИСО.

Рассмотрим эти типы преобразований и их отличия друг от друга более подробно.

Сначала рассмотрим преобразования пространства-времени и событий с точки зрения наблюдателя. Наблюдатель может наблюдать только в той инерциальной системе отсчета, относительно которой неподвижен. Вся информация о событиях в других инерциальных системах отсчета является косвенной, и восстанавливается на основе наблюдений в системе отсчета наблюдателя. Наблюдатель наблюдает, и на основе результатов наблюдений строит предположения о том, какие должны быть преобразования пространства-времени. Наблюдатель видит, что события, которые он наблюдает в одной системе отсчета, происходят и в других системах отсчета. Из этого наблюдатель может сделать вывод, что если событие происходит в одной системе отсчета, оно происходит в любой другой системе отсчета. На основе таких наблюдений и основанных на них выводах можно построить преобразования пространства-времени, полей и соответствующую теорию. Назову этот тип преобразований наблюдаемыми преобразованиями пространства-времени и полей.

Второй тип преобразования пространства-времени и полей, это преобразования пространства-времени и полей на основе полей, наблюдаемых в разных инерциальных системах отсчета наблюдателями, неподвижными относительно соответствующих инерциальных систем отсчета. Как было обсуждено выше, наблюдателям невозможно получить информацию о событиях, находящихся в инерциальных системах отсчета, движущимся относительно них, и напрямую сравнить их. Назовем этот тип преобразований прямыми преобразованиями пространства-времени-полей.

Из основного предположения гипотезы, мы получили, что должно существовать два типа преобразований пространства времени и полей.

5. Постулаты гипотезы

Теперь можно описать все постулаты гипотезы. Как мы писали, целью является построение обобщения СТО для плоского пространства-времени. Это означает, что явные постулаты СТО должны остаться без изменений. Все, что можно изменить – это какой-то неявный постулат СТО. При этом, так как мы говорим про обобщение, то его замена должна накладывать меньше ограничений. Для замены, выбран неявный постулат СТО о том, что принцип причинности применим к событиям одновременно во всех ИСО. Описано основное предположение гипотезы и возникающее из него следствие, которое необходимо для существования человека.

Напишем постулаты данной гипотезы. Сначала идут постулаты СТО, без изменений.

Постулат 1 (принцип относительности Эйнштейна). Законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга

Постулат 2: Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга

Теперь опишем новые постулаты.

Постулат 3 (модификация принципа причинности): принцип причинности применяется отдельно и независимо для каждой отличающейся инерциальной системы отсчета.

Этот постулат является основным предположением гипотезы.

Этот постулат менее ограничивающий, чем обычный принцип причинности, который действует на события во всех системах отсчета. Поэтому, добавление этого постулата не ограничивает, а расширяет гипотезу, по сравнению с СТО.

Постулат 4: при стремлении относительной скорости двух инерциальных систем отсчета к нулю, разница между применением принципа причинности отдельно для каждой из этих ИСО с применением принципа причинности одновременно к обоим ИСО должна стремиться к нулю.

Можно ли этот постулат рассматривать как отдельный постулат или это просто следствие предыдущего постулата, не вполне понятно. Выше уже было показано, как возникает это требование. Поэтому можно сказать, что это утверждение является следствием факта существования человека.

6. Специальная теория относительности как частный случай

Проверим, является ли специальная теория относительности, вместе с соответствующими преобразованиями полей, преобразованиями пространства-времени-полей с точки зрения наблюдателя.

Напишем условия, при которых можно будет это однозначно утверждать:

1. Одинаковость событий во всех системах отсчета, с точки зрения наблюдателя
2. Принцип причинности применяется ко всем ИСО, с точки зрения наблюдателя
3. Физические законы одинаковы во всех системах отсчета, с точки зрения наблюдателя
4. Скорость света в вакууме одинакова во всех системах отсчета, с точки зрения наблюдателя

Несложно заметить, что, если убрать добавку “с точки зрения наблюдателя” описанные выше условия описывают явные и неявные постулаты специальной теории относительности.

Выше было получено, что, с точки зрения наблюдателя, события во всех системах отсчета одинаковы. Поэтому выполняется первое условие.

Если, с точки зрения наблюдателя, события одинаковы во всех системах отсчета, то тогда и принцип причинности применяется, с точки зрения наблюдателя, ко всем ИСО.

Условия 3 и 4 выполняются, потому что они являются постулатами данной гипотезы, постулаты 1 и 2. Причем постулаты накладывают более строгие ограничения, чем только с точки зрения наблюдателя.

Поэтому делаем вывод, что в рамках данной гипотезы получена специальная теория относительности как частный случай преобразований пространства-времени, это преобразования пространства-времени с точки зрения наблюдателя. Внесения каких-либо изменений в уравнения СТО при этом не потребовалось.

Отметим, что при наличии предположения о том, что принцип причинности применим ко всем ИСО, имеются единственные преобразования пространства-времени, удовлетворяющие постулатам СТО. Отказ от этого предположения ведет к тому, что преобразования СТО перестают быть единственными возможными преобразованиями, удовлетворяющими постулатам 1 и 2.

Преобразования СТО, преобразования пространства-времени, возможно отделить от преобразований полей по причине того, что их можно получить без рассмотрения свойств полей.

Преобразования полей в этом случае должны быть ковариантными по отношению к преобразованиям СТО. Преобразования пространства-времени СТО и соответствующие преобразования полей образуют преобразования пространства-времени и полей с точки зрения наблюдателя.

5. Преобразования при стремлении относительной скорости систем отсчета к нулю

Рассмотрим, как ведут себя оба типа преобразований пространства-времени и полей при стремлении относительной скорости двух инерциальных систем отсчета к нулю.

При стремлении относительной скорости систем отсчета к нулю, согласно четвертому постулату, разница в применении принципа причинности, должна исчезать. Получается, что прямые преобразования пространства-времени и полей должны переходить в такие преобразования, где события одинаковы во всех системах отсчета. Преобразования с точки зрения наблюдателя, это такие преобразования, где события одинаковы во всех системах отсчета. Они соответствуют тем же постулатам что и прямые преобразования, отличаются лишь в том, что строятся в предположении верности принципа причинности для событий во всех системах отсчета. Следовательно, при стремлении относительной скорости систем отсчета к нулю, прямые преобразования пространства-времени и полей должны переходить в преобразования пространства-времени и полей с точки зрения наблюдателя, в преобразования СТО и соответствующие преобразования полей.

Хотя сам вид прямых преобразований мы не можем получить без более фундаментальной теории, мы получили ограничение на их возможный вид.

Заключение

Детально рассмотрено применение принципа причинности к инерциальным системам отсчета. Было обнаружено, что наблюдатель имеет только ту информацию, которую имеет та ИСО, относительно которой он неподвижен. Дальнейший анализ привел к выводу, что с точки зрения наблюдателя события в разных ИСО выглядят одинаковыми, даже при наличии фактической разницы в событиях. Делать какие-либо предположения при этом не потребовалось. Этот результат привел к гипотезе о том, что принцип причинности применяется отдельно и независимо для каждой отдельной ИСО.

Такая гипотеза приводит к тому, что возникает два типа преобразований при переходе между инерциальными системами отсчета. Первое это преобразования с точки зрения наблюдателя. Второй тип преобразований является новым типом преобразований, это прямые преобразования пространства-времени и полей.

Из постулатов гипотезы была получена специальная теория относительности, как преобразования пространства-времени с точки зрения наблюдателя. Внесения каких-либо изменений в уравнения СТО не потребовалось.

Точный вид прямых преобразования пространства-времени-полей в рамках данной гипотезы получить невозможно. Для этого требуется более глубокая теория.

Имеется ряд открытых вопросов. Например, необходимо детальное рассмотрение вопроса о том, можно ли как-то проверить принцип причинности и его применение к разным ИСО. Возможно, можно получить экспериментальные оценки на то, насколько применение принципа причинности отдельно к разным ИСО может приводить к разнице событий между ИСО

Другой открытый вопрос, тесно связанный с предыдущим, это поиск возможностей экспериментальной проверки гипотезы. Для этого, вероятно, потребуется разработка более глубокой теории, которая учитывала бы новый тип преобразований, который возникает в этой гипотезе. Но, возможно, более детальный анализ следствий гипотезы приведет к тому, что будут найдены способы проверки гипотезы без необходимости в построении более глубокой теории.

Литература

1. Amelino-Camelia, Giovanni (1 July 2002). "Doubly Special Relativity". *Nature*. 418 (6893): 34–35

2. Mattingly, David (2005). "Modern Tests of Lorentz Invariance". *Living Reviews in Relativity*. 8 (5): 5
3. Kostelecky, V.A.; Russell, N. (2011). "Data tables for Lorentz and CPT violation". *Reviews of Modern Physics*. 83 (1): 11–31
4. Liberati, S. (2013). "Tests of Lorentz invariance: a 2013 update". *Classical and Quantum Gravity*. 30 (13)