КВАНТОВАЯ И ГРАВИТАЦИОННАЯ ФИЗИКА
6:028, 16 с., 28.12.2025; doi:10.9751/KGF.6-028.9128
ISSN 2181-0478; EISSN 2181-0494
© 2025 ЦТФА. Все права сохранены

Время-симметричные релятивистская и квантовая теории.
1. Время-симметричные специальная и общая теории относительности

Захид Закир[1]

Аннотация

В релятивистской теории у частиц есть пары отрицательной энергии, которые считались нефизическими, но Дирак (1930) связал их с античастицами, Зисман (1940) и Штюкельберг (1941) показали, что они формально идут назад в обычном времени t, а Фейнман (1949) построил на их основе ковариантную диаграммную технику. Но описание античастиц через состояния отрицательной энергии оставалось неполным и поэтому возник ряд проблем. В статье, исходя из этой интерпретации, сформулирована время-симметричная теория относительности (ВСТО) без прежних проблем. В ВСТО собственное время частицы отрицательной энергии измеряется в её системе покоя, базис которой имеет отрицательную энергию и тоже идёт назад по оси t, в частности, в антиводороде протон отрицательной энергии реализует базис такой системы отсчёта. В ВСТО принцип относительности распространён на системы отсчёта, идущие обратно по оси t и в время-симметричной СТО группой симметрии становится общая группа Лоренца O(1,3), включающая 4-инверсию. Включение трансляций ведёт к общей группе Пуанкаре. В время-симметричной ОТО группа O(1,3) действует локально, а уравнения Эйнштейна и их решения не меняются. В ВСТО 4-векторы потока вероятности и токов взаимодействий меняют знак при 4-инверсии и в время-симметричной релятивистской квантовой теории это снимает ряд проблем (см. статьи 2 и 3).

Ключевые слова: частицы отрицательной энергии, интерпретация Зисмана-Штюкельберга-Фейнмана, античастицы, инверсия времени, 4-инверсия, общая группа Лоренца, специальная теория относительности, общая теория относительности

Содержание

1. Введение 2
2. От интерпретации ЗШФ к время-симметричной СТО 3
2.1. О движении частиц отрицательной энергии назад в обычном времени 3
2.2. Интерпретация ЗШФ дополненное системами покоя частиц отрицательной энергии ведёт к ВСТО 5
3. Время-симметричная СТО на базе общей группы Лоренца 7
3.1. Переход от полной к общей группе Лоренца 7
3.2. Плотности в ориентируемой гиперповерхности одновременности 9
3.3. Время-симметричная релятивистская механика свободных частиц 11
3.4. Время-симметричная релятивистская механика с взаимодействиями 13
4. Время-симметричная общая теория относительности 14
4.1. Физика в локально-инерциальных и неоднородных протяжённых системах отсчёта 14
4.2. Уравнения поля и эффекты гравитации в время-симметричной ОТО 15
5. Заключение 16
Литература 16

[1] *Центр теоретической физики и астрофизики, Ташкент, Узбекистан*; zzakir@qgph.uz ORCID

1. Введение

Одним из важнейших достижений релятивистской квантовой теории было предсказание античастиц при попытке интерпретации состояний отрицательной энергии, неизбежно появляющихся в ковариантной форме теории.

В гипотезе Дирака для фермионов [1], названной теорией дырок, считалось, что уровни отрицательной энергии заполнены, а дырки на этом фоне проявляются как античастицы. Но в теории дырок частицы, заполняющие уровни отрицательной энергии, считались тоже идущими *вперёд* в обычном времени t, что фактически противоречило релятивистской теории, где они могут идти только *назад* во времени t.

Открытие последнего свойства в 1940-1941 гг. Зисманом [2] и Штюкельбергом [3] было решающим шагом к адекватному описанию частиц отрицательной энергии. Это свойство позволило Фейнману создать в 1948-49 гг. пропагаторный подход и развить ковариантную диаграммную технику [4], лежащих в основе физики частиц (см. [5,6]).

Интерпретация Зисмана-Штюкельберга-Фейнмана (ЗШФ) основана на свойстве формализма релятивистской теории, где при глобальном рассмотрении траекторий в пространстве событий античастицы положительной энергии, идущие вперёд в обычном времени, эквивалентны частицам отрицательной энергии, идущим назад в этом времени. Такая возможность не гипотеза и проявляется в физике частиц в кроссинг-симметрии. Но эта интерпретация применялась непоследовательно, что вело к проблемам в теории, в частности, к проблеме отрицательной вероятности в теории бозонов. Более глубокой причиной было то, что прежняя форма релятивистской теории, созданная для состояний положительной энергии, не была приспособлена к состояниям отрицательной энергии.

В частности, в специальной теории относительности (СТО) вводились только обычные инерциальные системы отсчёта (ИСО), идущие вперёд во времени, из-за чего группа симметрии была ограничена ортохронной (полной) группой Лоренца $O^{\uparrow}(1,3)$, исключающей отражения оси времени. В результате в теории, вводящей (формально) частицы отрицательной энергии, для них не были предусмотрены системы покоя, где измерялись бы их собственные времена и другие собственные характеристики.

Для последовательного следования интерпретации ЗШФ требовалось поэтому введение (также формально) систем покоя и для частиц отрицательной энергии, которые тоже должны идти назад по оси t со своей осью времени t_{-} направленной обратно к t.

Физическую реализацию таких систем отсчёта показывает описание движения позитрона в атоме антиводорода, где антипротон в центре является базисом системы отсчёта со сферической системой координат. При описании движения позитрона в терминах электронов отрицательной энергии, антипротон тоже описывается как протон отрицательной энергии и реализует базис системы отсчёта, идущей назад по оси t.

Такое расширение релятивистской теории с включением систем отсчёта, идущих в нижний световой конус с соответствующим расширением принципа относительности, лежит в основе *время-симметричной теории относительности* (ВСТО), формулировка которой и является целью данной статьи. ВСТО включает время-симметричную СТО в плоском пространстве-времени и время симметричную ОТО в общем случае.

В время-симметричной СТО группой преобразований становится $O(1,3)$, называемая общей группой Лоренца [7]. Она включает группу поворотов и 4-инверсию системы координат, оставляющей инвариантной форму $x_0^2 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2$. Включение трансляций начала координат ведёт к общей группе Пуанкаре, оставляющей инвариантной форму $dx_0^2 - dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2$.

В время-симметричной СТО вводятся глобальные и локальные ИСО в плоском, а в время-симметричной ОТО в искривлённом пространстве-времени с локальной группой $O(1,3)$. При этом уравнения Эйнштейна и их решения не меняются. 4-инверсия не

меняет знак скорости, но меняет знак ускорения, а сближение мировых линий в прямой системе выглядит как их удаление в обратной системе.

В статье 2 будет показано, что отражение оси времени описывается унитарным оператором T, эквивалентного комбинации вигнеровского обращения времени T_W, описываемого антиунитарным оператором, и зарядового сопряжения C. Поэтому в ВСТО 4-инверсия PT заменяет CPT_W-преобразование прежней релятивистской квантовой теории. Как известно, T_W обращает процессы, переставляя начальные и конечные состояния, но не меняет ось времени и знак энергии, тогда как T в ВСТО меняет знаки энергии и токов. Поэтому T_W есть активное преобразование, когда отражаются отдельные векторы при той же оси времени, тогда как T является пассивным преобразованием, когда векторы прежние, а отражается ось времени.

В ВСТО 4-компонента потока вероятности имеет два знака для частиц, идущих в двух направления оси времени, что важно в релятивистской квантовой теории. В ней отпадает необходимость подменять поток вероятности токами взаимодействия, которая вела к абсурду для истинно нейтральных частиц, где равенство нулю тока взаимодействия выдавалось за равенство нулю потока вероятности. Абсурдная ситуация была и в теории Дирака, где потоку частиц в обратном к оси времени направлении соответствовал положительный поток вероятности фермионов. В ВСТО 4-вектор потока вероятности одинаков для всех свободных релятивистских частиц, имеет такой же знак, как вектор энергии-импульса, и меняет знак при 4-инверсии.

В разделе 2 описана интерпретация ЗШФ и рассмотрен более последовательный подход к учёту её требований, приводящий к ВСТО. В разделе 3 описаны основы время-симметричной СТО, а в разделе 4 – время-симметричной ОТО. Во статьях 2 и 3 изложены основы время-симметричной релятивистской квантовой теории, механики и теории поля. Первоначальные идеи и предварительные материалы по время-симметричному подходу были изложены в [8]. Более детальное изложение ВСТО дано в книге [10].

2. От интерпретации ЗШФ к время-симметричной СТО

2.1. О движении частиц отрицательной энергии назад в обычном времени

В релятивистской теории совокупность событий в разное время и в разных точках пространства задаётся в 4-мерном пространстве событий и в плоском пространстве-времени события фиксируются в одной из обычных ИСО K_+ с осью времени t. Для этого строится глобальная система физических координат с началом в событии O с помощью взаимно покоящихся стандартных масштабов и часов. Координатные оси строятся на базе четырёх ортов $\mathbf{e}_\mu$, $\mu = 0,...,3$, образующих обычно ортогональный репер. Контравариантные компоненты dx^μ коэффициентов разложения 4-вектора сдвига $d\mathbf{x}$ по векторам репера $d\mathbf{x} = dx^\mu \mathbf{e}_\mu$ дают координаты этого вектора. Скалярные произведения ортов дают метрический тензор $g_{\mu\nu} = \mathbf{e}_\mu \cdot \mathbf{e}_\nu$, ковариантные компоненты dx_μ равны скалярным произведениям $d\mathbf{x}$ и ортов $\mathbf{e}_\mu$:

$$\mathbf{e}_\mu \cdot d\mathbf{x} = \mathbf{e}_\mu \cdot \mathbf{e}_\nu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\nu = dx_\mu. \qquad (1)$$

Интервал собственного времени $d\tau_\pm$ между двумя близкими событиями на траектории частицы, измеряемый в её системе покоя K'_+, выражается через интервал времени dt между этими же событиями в K_+, где эта частица движется со скоростью

$v^i = dx^i / dt$ (здесь $i = 1,2,3$ и $v^2 = v_i v^i$). Эта зависимость следует из мысленных экспериментов с учётом инвариантности скорости света и пространственно-временного интервала ds, и в статической системе координат, где локальные базисы взаимно неподвижны, даётся выражениями:

$$ds^2 = c^2 d\tau_\pm^2 = d\mathbf{x} \cdot d\mathbf{x} = dx_0 dx^0 + dx_i dx^i, \tag{2}$$

$$d\tau_\pm = \pm dt\sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad \frac{dt}{d\tau_\pm} = \pm\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = u_\pm^0. \tag{3}$$

В обычной теории относительности отрицательный знак в (3) отбрасывался как лишний, считая, что для реальных частиц и античастиц их собственное время τ всегда растёт с ростом времени системы отсчёта t. Это так и в природе нет объектов, которым соответствовал бы отрицательный знак в (3). В ВСТО, которая будет формулироваться далее, ситуация такая же и реальным объектам тоже соответствует знак плюс в (3).

Однако, после создания теории относительности ситуация в физике изменилась и были открыты пары для всех частиц, их античастица. Частица и античастица оказались связанными новой симметрией – зарядовой симметрией. Поскольку число реальных состояний удвоилось, то появилась возможность не отбрасывать прежние «лишние» состояния с отрицательным знаком в (3), а каким-то образом использовать их для описания античастиц. Эта возможность, реализованная в интерпретации ЗШФ ограниченном объёме, в ВСТО реализуется в полном объёме и поэтому далее основные соотношения теории приведём для обеих знаков в (3).

Основным следствием соотношений (3) является то, что компоненты 4-скорости:

$$u_\pm^\mu = \frac{dx^\mu}{ds_\pm} = \frac{dx^\mu}{cd\tau_\pm} \tag{4}$$

имеют два знака не только вдоль пространственных осей, но и вдоль оси времени.

Собственное время частицы $\tau_\pm$ измеряется часами, которые *сопутствуют* ей, и поэтому $\tau_\pm$ всегда возрастает вдоль траектории частицы. Однако направление хода $\tau_\pm$ и направление хода t совпадают лишь для τ_+, когда траектория идёт вперёд по оси t. Нетривиальным свойством релятивистской теории, открытым Зисманом в 1940 г. [2] и Штюкельбергом в 1941 г. [3], является тот факт, что в ней формально появляются траектории с τ_- в (3), идущие обратно оси t, когда τ_- растёт вдоль траектории, а t уменьшается, что и выражает отрицательный знак в (3).

Такое свойство проявилось только в релятивистской физике, где понятие времени события богаче, чем в нерелятивистской физике и разделяется на две части. Во-первых, это инвариантное собственное время частицы $\tau_\pm$, которое измеряется в её системе покоя. Во-вторых, это времена t, t', t'',… этого события в разных ИСО, где эта частица движется с разными скоростями. Эти времена относительны, так как одному и тому же интервалу $\Delta\tau_+$, согласно (3), соответствуют разные интервалы Δt, $\Delta t'$, $\Delta t''$.

Отличие *величин* интервалов времён Δt, измеряемых в разных ИСО, было началом создания СТО и это открыло новую эпоху в физике. Возможность же отличия также и *знаков* этих интервалов времени впервые было изучено в 1940-41 гг. [2,3], но это ни тогда, ни за прошедшее время не привело к постановке задачи соответствующего расширения релятивистской теории. Такое расширение с включением в теорию нового класса систем отсчёта, идущих в нижний световой конус, соответствующим образом расширив группу преобразований и формулируя ВСТО, будет описано ниже.

Само по себе отличие знаков Δt и $\Delta\tau_-$ не имело бы физического смысла, оставаясь формальной возможностью, не имеющей отношения к реальности. Чисто математические аспекты такого расширения были изучены давно [7]. Однако оно приобрело физический смысл после открытия ещё двух нетривиальных фактов. Первый, ключевой из них, рассмотрим здесь, а второй факт рассмотрим в следующем разделе.

Первый ключевой факт состоит в том, что с ростом собственного времени вдоль траектории интервалам $\Delta\tau_\pm > 0$ соответствуют не только два знака интервалов обычного времени $\pm\Delta t$, но и два знака энергии частицы, т.е. *с изменением знака* Δt *меняется также и знак энергии*. Это следует из определения 4-импульса:

$$p^\mu_\pm = mcu^\mu_\pm = mc\frac{dx^\mu}{ds_\pm} = m\frac{dx^\mu}{d\tau_\pm}, \tag{5}$$

которое вместе с (3) даёт для энергии $E_{p\pm} = cp^0_\pm = mc^2u^0_\pm$ выражение:

$$E_{p\pm} = mc^2\frac{dt}{d\tau_\pm} = \pm\frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \tag{6}$$

Отсюда видно, что различие в знаках энергий частиц определяется только фактором $dt/d\tau_\pm$ и отрицательный знак в (3) ведёт к отрицательному знаку энергии в (6). Таким образом, форма $E_{p\pm}t_\pm$ является инвариантной при отражении оси времени.

При изменении направления траектории только по оси времени пространственные компоненты 4-скорости $u^i_\pm$ в (4) не меняются, так как до и после поворота траектории назад во времени частица продолжает идти в положительном направлении оси x^1 с $dx^1/d\tau_\pm > 0$, так как с ростом $\tau_\pm$ продолжает расти также x^1.

Таким образом, в релятивистской теории частицы положительной энергии идут только вперёд, а частицы отрицательной энергии – только назад в обычном времени t.

Это, в частности, показывает несостоятельность с физической точки зрения многочисленных гипотез, в которых вводятся состояния отрицательной энергии, эволюционирующие вперёд во времени. Первой и наиболее известной из них является теория дырок Дирака [1]. Тот факт, что эта и подобные ей гипотезы противоречат релятивистской теории и потому недопустимы, до сих пор не был осознан в достаточной мере и поэтому не был отражён в научной и учебной литературе.

2.2. Интерпретация ЗШФ дополненное системами покоя частиц отрицательной энергии ведёт к ВСТО

Перейдём ко второму из нетривиальных фактов, связанных с отрицательными энергиями. Если в формализме релятивистской теории фигурируют частицы с такой энергией, которые ещё и идут назад в обычном времени, как это обсуждалось в предыдущем разделе, то возникает вопрос: в чём физический смысл таких состояний?

Ответ оказался неожиданным и нетривиальным: в природе есть только частицы и античастицы положительной энергии, идущие только вперёд в обычном времени t, но *в ковариантной форме релятивистской теории античастицы фигурируют как частицы отрицательной энергии, идущие обратно по оси времени* t. Это необычное свойство формализма теории и есть второй ключевой факт, придавший физический смысл эволюции назад во времени. Он и лежит в основе интерпретации ЗШФ и далее в более систематической форме ВСТО, так как состояния отрицательной энергии оказались наиболее простым и практичным способом описания реальных античастиц.

Формулировка релятивистской квантовой теории на базе интерпретации ЗШФ, где античастиц нет, а есть лишь частицы двух знаков энергии, идущие в зависимости от этого знака вперёд или назад во времени, было дано Фейнманом в 1948-1949 гг. [4]. При этом он развил на этой основе пропагаторный подход и ковариантную диаграммную технику, а также метод континуальных интегралов, которые стали эффективными и практичными инструментами физики.

Переход к интерпретации ЗШФ упрощает описание систем частиц и античастиц, поскольку вместо двух видов объектов с противоположными зарядами, есть лишь один вид - частицы, а античастицы описываются как некие состояния частиц, отличающиеся лишь кинематически, знаками энергии и направлениями хода собственных времён.

Такое упрощение формализма аналогично переходу к весьма компактным и эффективным представлениям в двух фундаментально важных формализмах. В одном случае это введение одного комплексного числа вместо двух вещественных - хотя комплексных чисел в реальности нет, но оперировать ими проще и эффективнее, чем с двумя вещественными. В другом случае – это переход в пространство событий, где время есть четвёртое (мнимое) измерение в дополнение к трём измерениям пространства. Здесь реальное пространство трёхмерное, но переход в 4-пространство делает теорию проще и эффективнее, позволяя, в частности, обобщить её на искривлённое пространство-время.

Итак, интерпретация ЗШФ не гипотеза, а следствие релятивистской кинематики, позволяющее эффективно использовать базовые свойства формализма релятивистской теории для описания античастиц. В квантовой теории она позволяет формулировать теорию в явно ковариантной форме, что роднит её с тем, что было сделано Минковским.

Интерпретация ЗШФ лежит в основе релятивистской квантовой механики, однако даже в этой науке она применялась до сих пор крайне непоследовательно. Это затем приводило к проблемам, в том числе и к внутренним противоречиям в теории. Наиболее известная из них – это проблема отрицательных вероятностей в теории бозонов.

Главным противоречием в стандартной формулировке релятивистской квантовой механики на базе интерпретация ЗШФ было то, что теория оперировала собственным временем частиц отрицательной энергии, но не предусматривала системы покоя для этих частиц, где оно бы измерялось. Другой проблемой была несовместимость интерпретации ЗШФ со стандартной квантовой теорией поля, где есть только состояния положительной энергии, а вакуум есть состояние наименьшей энергии. Античастицы фермионов при этом по-прежнему описываются спинорами для состояний отрицательной энергии из-за их крайнего удобства, несмотря на противоречивость такого подхода.

Поэтому для последовательного проведения интерпретации ЗШФ необходим учёт указанных выше двух обстоятельств, а именно того, что:

а) частицы отрицательной энергии имеют системы покоя, которые также идут назад в обычном времени, а траектории их элементов пересекают гиперповерхность одновременности $t = const$ сверху вниз по оси времени;

б) поэтому релятивистскую теорию необходимо расширить на такие системы отсчёта, которые идут в нижний световой конус, и координаты которых связаны с обычными координатами через инверсию времени, а в общем случае через 4-инверсию.

Вопрос о корректном учёте этих обстоятельств был поставлен в более ранних публикациях автора и это привело к выводу о необходимости время-симметричного расширения теории относительности. Далее в статье будут изложены основные положения таким образом расширенной время-симметричной релятивистской теории.

Пример физической реализации системы отсчёта, идущей назад по оси t, был приведён во Введении. Это случай описания атома антиводорода в интерпретации ЗШФ. Здесь базисом системы отсчёта со сферическими координатами является антипротон, описываемый как протон с отрицательной энергией, и система отсчёта с таким базисом, естественно, идёт назад по оси t. Антипротон сопровождает позитрон, описываемый как электрон с отрицательной энергией, тоже идущий назад по оси t.

Условие инвариантности $x_0^2 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2$ определяет группу преобразований координат, включающих повороты и отражения осей. Эта группа есть общая группа Лоренца $O(1,3)$, включающая 4-инверсию $x_-^\mu = -x^\mu$. Поэтому в время-симметричной СТО группой преобразований координат становится $O(1,3)$.

При включении трансляций, состоящих в выборе другого события как начала координат и точки поворота соответствующих осей, общая группа Лоренца переходит в общую группу Пуанкаре, оставляющей инвариантной форму $dx_0^2 - dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2$. Следствия этой группы будут рассмотрены в [10]. Математические аспекты группы $O(1,3)$ рассмотрены в [7] и основные факты о ней, необходимая для физических применений, также приводятся в книге [10].

Отметим, что ВСТО, распространяющая интерпретацию ЗШФ на системы отсчёта сопутствующие частицам отрицательной энергии, также не содержит новых гипотез. Её математический формализм является естественным обобщением обычного формализма релятивистской теории для эволюции вперёд во времени на эволюцию назад во времени. Более того, он уже содержался в формализме обычной теории относительности, но считался нефизическим и отбрасывался. ВСТО придаёт этой части физический смысл, связав её с античастицами, что в результате приводит к теории, которая в ковариантном и компактном виде описывает системы из частиц и античастиц положительной энергии путём более эффективного использования возможностей существующего формализма.

3. Время-симметричная СТО на базе общей группы Лоренца

3.1. Переход от полной к общей группе Лоренца

Стандартная формулировка интерпретации ЗШФ была основана на ограничении обычными системами отсчёта K_+, элементы которых состоят из частиц положительной энергии, идущих только вперёд во времени t. Преобразования координат из одной ИСО в другую были ограничены поэтому ортохронной (полной) группой Лоренца $O^\uparrow(1,3)$, действующей в верхнем световом конус и допускающей отражения пространственных координат, но сохраняющей ось времени.

Вводилась лишь симметрия относительно замены частиц на античастицы, инвариантность относительно операции зарядового сопряжения *C*, иногда вместе с преобразованием чётности *P*. Операция обращения времени T_W вводилась как активная, когда меняются векторы и обращаются во времени процессы при той же оси времени, т.е. интервал времени меняет знак при смене последовательности событий. Поэтому обращение интервалов времени вело к обращению скоростей и других производных по времени в обратимых процессах с перестановкой начальных и конечных состояний.

При использовании интерпретации ЗШФ ограничение обычными системами отсчёта, как было отмечено выше, ведёт к внутреннему противоречию в теории, так как частицы положительной энергии имели системы покоя, где измеряется их собственное время, а для частиц отрицательной энергии системы покоя не были предусмотрены.

Если некоторые частицы могут идти вдоль своей мировой линии формально назад во времени, то все физические аспекты кинематики и динамики, также формально, должны быть адаптированы к такому радикальному изменению временной эволюции. Частице, идущей назад во времени, не может сопутствовать локальный элемент обычной системы отсчёта, идущий вперёд во времени, в частности, часы, измеряющие собственное время обычных частиц. Часы измеряющие собственное время частицы отрицательной энергии должны *сопутствовать* ей и поэтому тоже должны идти назад в обычном времени. Это означает, что они должны состоять из частиц отрицательной

энергии и быть элементом системы отсчёта, идущей назад во времени. Физически это означает, что речь идёт о системах отсчёта, все элементы которых состоят из античастиц, описанных в терминах отрицательных энергий.

При обычном же рассмотрении симметрии относительно замены частиц на античастицы допускалась скрытая асимметрия, так как система отсчёта продолжала оставаться той же самой, т.е. состоящей из обычных частиц. Полная симметрия требует замены и её тоже на систему отсчёта состоящей из античастиц, так как речь идёт условно о замене мира на антимир. Этот способ описания, очевидно, не применим в ситуации, когда базис системы отсчёта состоит из примеси частиц и античастиц.

Итак, переход к интерпретации ЗШФ требует расширения группы преобразований координат систем отсчёта до $O(1,3)$ с $t_- = -t$ в частном и 4-инверсией $x_-^\mu = -x^\mu$ в общем случаях. В этой группе кроме двух собственных преобразований систем с взаимно обратными осями времени, есть и переходы между ними через инверсию оси времени.

Обычные собственные преобразования Лоренца со стандартной матрицей Λ_ν^μ из ортохронной группы $O^\uparrow(1,3)$ связывают координаты события в двух системах отсчёта K_+ и K'_+, идущих вперёд в обычном времени:

$$x_+^{\mu\,\prime} = \Lambda_{\nu+}^\mu x_+^\nu. \tag{7}$$

В двух системах покоя частиц отрицательной энергии K_- и K'_-, идущих назад в обычном времени, координаты события также связаны собственными преобразованиями Лоренца с матрицей $\Lambda_{\nu-}^\mu$ из $O^\uparrow(1,3)$, формально такой же, как $\Lambda_{\nu+}^\mu$:

$$x_-^{\mu\,\prime} = \Lambda_{\nu-}^\mu x_-^\nu. \tag{8}$$

Координаты события x_-^μ связаны с обычными координатами x_+^μ этого же события в K_+ несобственными преобразованиями $\Lambda_{\nu-+}^\mu$, $\Lambda_{\nu+-}^\mu$ из антихронной группы $O^\downarrow(1,3)$, включающей инверсию оси времени:

$$x_+^{\mu\,\prime} = \Lambda_{\nu+-}^\mu x_-^\nu, \qquad x_-^{\mu\,\prime} = \Lambda_{\nu-+}^\mu x_+^\nu. \tag{9}$$

При одинаковых началах и параллельных осях обеих систем координат, т.е. при нулевой относительной 3-скорости двух систем отсчёта, 4-инверсия глобальной системы координат в пространстве событий имеет вид:

$$x_-^\mu = \Lambda_{\nu-+}^\mu x_+^\nu = -x_+^\mu, \quad \Lambda_{\nu-+}^\mu = -\delta_\nu^\mu. \tag{10}$$

При этом оси времени этих систем координат направлены во взаимно обратные стороны:

$$x_-^0 = -x_+^0. \tag{11}$$

Инвариантность относительно группы $O(1,3)$ следует из обобщения принципа относительности об одинаковости законов физики для частиц двух знаков энергии в системах отсчёта с соответствующими знаками энергии, идущими в пространстве и времени во взаимно обратных направлениях. Уравнение движение для частицы положительной энергии в системе отсчёта, идущей вперёд во времени такое же, как и уравнение движения для частицы отрицательной энергии в системе отсчёта, идущей назад во времени с координатами, связанными с обычными 4-инверсией (10).

При 4-инверсии (10), связывающей координаты двух классов систем отсчёта, меняются знаки всех полярных 4-векторов. Поэтому если, оставаясь в K_+, переходим к

частице, идущей обратно во времени, то меняется знак 4-импульса $p_-^\mu \to -p_+^\mu$, а также 4-вектора потока вероятности $j_-^\mu \to -j_+^\mu$.

Если начать с рассмотрения состояний, когда частицы обеих знаков энергии покоятся в пространстве с равными нулю 3-скоростями $v_-^i = -v_+^i = 0$, то даже в этом случае они *не покоятся во времени*. Их мировые линии, будучи параллельными, идут в противоположных направлениях оси времени, так как 4-скорость первой частицы $u_+^\mu = (1,0)$, а второй $u_-^\mu = (-1,0)$.

Отметим, что переход к ВСТО принципиально меняет ситуацию с интерпретацией ЗШФ, так как последняя обобщается и становится применимой к системам отсчёта обеих классов, в каждой из которых описывается движение частиц двух знаков энергии. Знак в (2) теперь зависит от сочетания направлений эволюции во времени частицы и системы отсчёта, где описывается движение. В частности, для частиц идущих назад в обычном времени t_+ этот знак отрицателен в K_+, но становится положительным в K_-, так как $dt_- = -dt_+$:

$$d\tau_- = -dt_+\sqrt{1-\mathbf{v}^2/c^2}, \quad d\tau_- = dt_-\sqrt{1-\mathbf{v}^2/c^2}. \tag{12}$$

3.2. Плотности в ориентируемых гиперповерхностях одновременности

При 4-инверсии полярные 4-векторы меняют знак и это свойство должно иметь место для любых объектов с отрицательной энергией. Но в релятивистской квантовой теории это не обеспечивалось, что и вело к части проблем. Поэтому рассмотрим требования ВСТО к свойствам важных векторов и образованных из них тензоров.

Первым из них является вектор нормали к гиперповерхности одновременности $t = const$, который в терминах физического времени направлен в будущее для K_+ и обратно к нему в K_-. В K_+ этот вектор имеет единственную отличную от нуля компоненту $\mathbf{e}_0$, направленную по или против оси x^0 и его направление определяет знак элемента ориентированного 3-объёма.

Инвариантная (собственная) плотность энергии-импульса $\varepsilon \geq 0$, измеряемая в системе покоя вещества (или малого участка поля) в данном элементе объёма, является положительно-определённой для объектов обеих знаков энергии и определяется как:

$$\varepsilon = c\frac{dp^0_{(0)}}{dV_{(0)}}. \tag{13}$$

Здесь $dV_{(0)}$ - элемент собственного 3-объёма, $p^0_{(0)}$ - собственная энергия. 4-вектор плотности энергии-импульса $\boldsymbol{\varepsilon}$ определяется тогда как произведение ε и 4-скорости частицы $\mathbf{u} = \mathbf{dx}/d\tau$, где $\mathbf{dx}$ - 4-вектор сдвига:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon\mathbf{u} = \frac{dp^0_{(0)}}{dV_{(0)}}\frac{\mathbf{dx}}{d\tau}. \tag{14}$$

Компоненты тензора плотности энергии-импульса $T^{\mu\nu}$ для идеальной жидкости, включающие также и (собственное) давление p, имеют вид:

$$T^{\mu\nu} = [(\varepsilon + p)u^\mu u^\nu - g^{\mu\nu}p]. \tag{15}$$

В отсутствие давления компоненты $T^{\mu\nu}$ квадратичные по 4-скорости и не меняются при 4-инверсии, в частности, компонента $T^{00} = \varepsilon u^0 u^0 \geq 0$ положительно-определённая для вещества и поля обеих знаков энергии, так как $\varepsilon \geq 0$. Этот факт важен для теории гравитации в время-симметричной ОТО, где уравнения Эйнштейна остаются прежними.

В ВСТО знак 4-компоненты векторов разных потоков, включая потока вероятности, меняется при изменении направления потока по оси времени. Траектории частиц пересекают гиперповерхность $x^0 = const$ снизу-вверх при положительной, и сверху-вниз при отрицательной энергиях и знак потока показывает направление пересечения гиперповерхности по оси времени.

Вероятность w положительно-определённая скалярная величина и не меняется при 4-инверсии, оставаясь положительно-определённой и при отрицательных энергиях. В K_+ 4-вектор плотности потока вероятности $\mathbf{j}$ есть произведение собственной плотности вероятности $\rho_{(0)} = dw / dV_{(0)} \geq 0$ и 4-скорости дрейфа частиц $\mathbf{u}$:

$$\mathbf{j} = \frac{dw}{dV_{(0)}} \frac{\mathbf{dx}}{d\tau} = \rho_{(0)} c\mathbf{u} = \frac{1}{m} \rho_{(0)} \mathbf{p}. \tag{16}$$

Таким образом, координаты 4-вектора $\mathbf{j}$ преобразуются также, как координаты 4-вектора сдвига $\mathbf{dx}$ и, подобно электромагнитному току, пропорциональны координатам 4-импульса $\mathbf{p}$. 4-объём инвариантен $d^4x = cd\tau dV_{(0)} = cdtdV$ и поэтому для положительных энергий (16) сводится к стандартному выражению:

$$\mathbf{j} = \frac{dw}{dV} \frac{\mathbf{dx}}{dt} = \rho \frac{\mathbf{dx}}{dt}. \tag{17}$$

Координаты $\mathbf{j}$ определяются как $j^\mu_\pm = \mathbf{j}_\pm \cdot \mathbf{e}^\mu$ и, в частности, компонента $j^0_\pm$ пропорциональна энергии частиц потока и тоже имеет два знака:

$$j^0_\pm = \rho_{(0)} \frac{dx^0_\pm}{d\tau} = \rho_{(0)} c u^0_\pm = \rho_{(0)} \frac{p^0_\pm}{m}. \tag{18}$$

Таким образом, в K_+ знак $j^0_\pm$ совпадает со знаком энергии частиц, при этом $j^0_+ > 0$ описывает плотность потока вероятности частиц положительной энергии, идущих по оси t_+, а $j^0_- < 0$ описывает плотность потока вероятности частиц отрицательной энергии идущих обратно к оси t_+.

Координаты 4-вектора плотности электромагнитного тока j^μ_q определяются аналогично j^μ и отличаются лишь заменой плотности вероятности ρ на плотность заряда $\rho_q = dq / dV$, знак которой зависит ещё и от знака заряда $q = \pm|q|$:

$$j^\mu_q = \rho_q \frac{dx^\mu}{dt} = \frac{dq}{dV_{(0)}} \frac{dx^\mu}{d\tau} = \rho_{q(0)} cu^\mu = \rho_{q(0)} \frac{p^\mu}{m}. \tag{19}$$

Знак j^μ_q зависит здесь от сочетания знаков 4-импульса p^μ и заряда.

В частном случае частицы положительного заряда с $\rho_{q(0)} > 0$, которая идёт в обеих направлениях времени, временная компонента плотности тока j^0_q аналогична плотности потока вероятности (18). Она тоже имеет два знака в зависимости от того, в

каком направлении по оси t_+ поток заряда пересекает гиперповерхность $x^0 = const$, т.е. зависит от знака энергии:

$$j^0_{q\pm} = \rho_{q(0)} c u^0_{\pm} = \rho_{q(0)} \frac{p^0_{\pm}}{m}. \tag{20}$$

В общем случае, когда рассматриваются оба знака заряда, одна и та же величина плотности тока в (20) соответствует двум разным ситуациям. Положительная плотность тока $j^0_q > 0$ описывает как движение вперёд во времени положительного заряда, так и движение назад во времени отрицательного заряда. Отрицательная же плотность тока $j^0_q < 0$ описывает как движение назад во времени положительного заряда, так и движение вперёд во времени отрицательного заряда.

В интерпретации ЗШФ используются именно эти свойства плотности тока: если $j^0_q > 0$ соответствует обычной частице с положительным зарядом, то этой же частице, идущей назад во времени соответствует $j^0_q < 0$, что также можно интерпретировать как античастицу с отрицательным зарядом, которая идёт вперёд во времени.

3.3. Время-симметричная релятивистская механика свободных частиц

В обычной СТО функции действия вдоль траекторий свободных частиц и античастиц положительной энергии одинаковы и в K_+ имеют вид:

$$S = -mc^2 \int_{\tau_0}^{\tau_1} d\tau_+ = -mc^2 \int_{t(\tau_0)}^{t(\tau_1)} dt \cdot \frac{d\tau_+}{dt} = \int_{t_0}^{t_1} dt\, L_+, \tag{21}$$

$$L_+ = -mc^2 \frac{d\tau_+}{dt} = -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}, \tag{22}$$

где $t_1 = t(\tau_1)$, $t_0 = t(\tau_0)$, при этом $\tau_1 > \tau_0$ и $t_1 > t_0$. При взаимодействиях частица и античастица отличаются зарядами и их состояния связаны через зарядовое сопряжение.

При описании античастицы как частицы отрицательной энергии заряд остаётся таким же как у частицы и меняются только знаки энергии и направления эволюции. Производная по t отрицательная: $d\tau_- / dt = -\sqrt{1 - v^2/c^2}$ и в K_+ рост собственного времени частиц отрицательной энергии вдоль траектории происходит при уменьшении t, т.е. $\tau_1 > \tau_0$ ведёт к $t_1 < t_0$. В K_- функция действия имеет такой же вид как в (21):

$$S = -mc^2 \int_{\tau_0}^{\tau_1} d\tau_- = -mc^2 \int_{t_{0-}}^{t_{1-}} dt_- \cdot \frac{d\tau_-}{dt_-} = \int_{t_{0-}}^{t_{1-}} dt_- L_{(-)}, \tag{23}$$

$$L_{(-)} = -mc^2 \frac{d\tau_-}{dt_-} = -mc^2 \sqrt{1 - v_-^2/c^2}. \tag{24}$$

Перейти к записи этой функции действия в K_+ можем двумя способами. Проще всего, используя (3), можем записать интеграл сразу в терминах обычного времени t:

$$S = -mc^2 \int_{t(\tau_0)}^{t(\tau_1)} dt \frac{d\tau_-}{dt} = \int_{t_0}^{t_1} dt\, L_-, \qquad L_- = mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad t_1 < t_0. \tag{25}$$

Отметим, что здесь отличия от (21) состоят в отрицательном знаке лагранжиана $L_- = -L_+$ и в интегрировании назад в обычном времени с $t_1 < t_0$. При более детальном прослеживании такого перехода надо произвести в (23) инверсию $t_- = -t$ и, ввиду трансляционной инвариантности, сдвинуть пределы интеграла на $t_0 + t_1$, что даёт:

$$S = \int_{-t_0}^{-t_1} d(-t) L_{(-)} = \int_{t_1}^{t_0} dt\, L_-, \quad t_1 > t_0. \tag{26}$$

Переобозначив пределы интегрирования, чтобы начальной точкой была t_0, а конечной t_1, получаем (25) с $t_1 < t_0$. Итак, при 4-инверсии функция Лагранжа меняет знак, что естественно, так как её знак определяет знак энергии:

$$E_\pm = p_{i\pm} v^i - L_\pm, \quad p_{i\pm} = \frac{\partial L_\pm}{\partial v^i}, \; v^i = \frac{dx^i}{dt}, \tag{27}$$

учитывая, что при 4-инверсии знак скорости v^i не меняется ($i = 1,2,3$).

Функцию действия для частицы с состояниями двух знаков энергии, тем самым, можно записать в условном виде:

$$S = \theta(t_1 - t_0) \int_{t_0}^{t_1} dt\, L_+ + \theta(t_0 - t_1) \int_{t_0}^{t_1} dt\, L_-. \tag{28}$$

При $t_1 \neq t_0$ эта запись строгая, но при $t_1 \to t_0$ необходимо уточнение, поскольку θ-функция испытывает разрыв, а её производная даёт $\delta(t_1 - t_0)$. Поскольку при $t_1 \to t_0$ определённые интегралы в (28) зануляются, то эта запись становится корректной при условии определения предельного перехода в той последовательности, когда при $t_1 \to t_0$ сначала зануляется интеграл. Эта ситуация подобна приданию физического смысла квадрату δ-функции, когда одна из δ-функций оставляется конечной. В нашем случае δ-функция оставляется конечной, а интеграл зануляется. Далее интегралы по времени будем считать записанными в таком время-симметричном виде.

В общем случае системы с двумя знаками энергии обобщённые координаты $q_\pm = (q_\pm^1, ..., q_\pm^n)$ и их обобщённые скорости $\dot{q}_\pm$ определяют функцию Лагранжа $L_\pm = \pm L(q_\pm, \dot{q}_\pm)$, где $L(q_+, \dot{q}_+)$ для частицы положительной энергии, а $L(q_-, \dot{q}_-)$ есть та же функция Лагранжа, но с заменой переменных q_+ и $\dot{q}_+$ на q_- и $\dot{q}_-$. Действие тогда имеет вид (28). В канонической формулировке обобщённые импульсы $p_\pm$, а также функции Гамильтона $H_+ = H(q_+, \dot{q}_+)$ и $H_- = -H(q_-, \dot{q}_-)$ определяются как:

$$p_\pm = \frac{\partial L_\pm}{\partial \dot{q}_\pm}, \quad H_\pm = p_\pm \dot{q}_\pm - L_\pm, \quad H_\pm = \pm H(q_\pm, p_\pm). \tag{29}$$

Уравнения Гамильтона-Якоби, следующие из (28)-(29), имеют вид:

$$\pm \frac{\partial S}{\partial t} + H_\pm = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial t} + H(q_\pm, p_\pm) = 0. \tag{30}$$

Для протяжённых объектов и полей вводятся плотности функции Лагранжа L и функции Гамильтона H:

$$S = \int d^4x[\mathsf{L}_+(q_+,\dot{q}_+) + \mathsf{L}_-(q_-,\dot{q}_-)] = \\ = \int d^4x[\,p_+\dot{q}_+ + p_-\dot{q}_- - \mathsf{H}_+(q_+,p_+) - \mathsf{H}_-(q_-,p_-)]. \tag{31}$$

Здесь знаки $\mathsf{L}_\pm$ и $\mathsf{H}_\pm$ определяются направлениями интегрирования вперёд или назад во времени. Соответствующие уравнения движения имеют вид:

$$\dot{q}_\pm = \frac{\partial \mathsf{H}_\pm}{\partial p_\pm}, \quad \dot{p}_\pm = -\frac{\partial \mathsf{H}_\pm}{\partial q_\pm}. \tag{32}$$

Время-симметричные формулировки механики и теории поля описывают системы с частицами и античастицами также и в нерелятивистском приближении. Обычное же ограничение только частицами было связано с редкостью античастиц низких энергий и исключением из формализма нерелятивистской теории практически неиспользуемых частей. В квантовой теории ВСТО ведёт к время-симметричным релятивистской квантовой механике и квантовой теории поля на базе общей группы Лоренца, которые описаны во статьях 2 и 3.

3.4. Время-симметричная релятивистская механика с взаимодействиями

Рассмотрим простейший случай наличия у частицы электрического заряда. Тогда в K_+ частица и античастица имеют противоположные заряды и притягиваются, а их мировые линии сближаются и при встрече пара аннигилирует. При рождении пары они по-прежнему притягиваются, удаляясь при большом противоположном импульсе. Эти же два процесса в K_- переставляются местами.

Поэтому включение взаимодействий приводит к асимметрии относительно отражения оси времени для конкретного процесса взаимодействия, но имеется симметрия более высокого уровня, *кроссинг-симметрия*. Она означает наличие другого процесса, когда траектории частиц переброшены из одного светового конуса в другой с изменением знаков их 4-испульсов.

При наличии взаимодействий, смешивающих два типа состояний разного знака энергии, их канонические переменные можно объединить:

$$q = q_+ + q_-, \quad p = p_+ + p_- \tag{33}$$

и записать общую функцию действия в компактном виде:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} dt\, L(q,\dot{q}) = \int_{t_0}^{t_1} dt\,[\,p\dot{q} - H(q,p)]. \tag{34}$$

Здесь пределы интеграла по времени выбираются в зависимости от знака энергии для членов с однотипными переменными, а для смешанных в членах взаимодействия берутся обычные пределы. Время-симметричные уравнение Гамильтона-Якоби имеет вид:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + H(q,p) = 0. \tag{35}$$

Для протяжённых объектов и полей имеем:

$$S = \int d^4x\,\mathsf{L}(q,\dot{q}) = \int d^4x\,[\,p\dot{q} - \mathsf{H}(q,p)]. \tag{36}$$

Возможен и матричный способ объединения обобщённых координат двух типов:

$$q = \begin{pmatrix} q_+ \\ q_- \end{pmatrix}, \quad p = \begin{pmatrix} p_+ \\ p_- \end{pmatrix}, \tag{37}$$

который может оказаться более удобным для определённых систем. Этот способ описания естественным образом приводит к формализму изоспина при описании пар частица-античастица и часто используется в физике частиц.

4. Время-симметричная общая теория относительности

4.1. Физика в локально-инерциальных и неоднородных протяжённых системах отсчёта

В время-симметричной СТО пространство-время плоское и события описываются в глобальных инерциальных системах отсчёта (ГИСО). ГИСО состоят из состыкованных в данный момент времени взаимно покоящихся локальных базисов и связанных с ними тетрад. Локальные системы физических координат образуются из стандартных масштабов, состыкованных в определённом порядке, и синхронизованных стандартных часов, а группой симметрии этих координат, как локальных, так и глобальных, является $O(1,3)$.

Для отдельных ускоренных объектов вводятся мгновенно-сопутствующих им локально-инерциальные системы отсчёта (ЛИСО), где преобразования группы $O(1,3)$ становятся локальными. *Принцип локальности*, согласно которому при ускоренном движении объектов все локальные релятивистские эффекты с ними сводятся к эффектам скорости, позволяет, оставаясь в ГИСО с мировым временем t, корректно описывать в рамках СТО все явления с ускоренными объектами. При этом возникают специфические свойства совокупности ЛИСО вдоль траекторий ускоренных объектов при однократном, многократном или непрерывном переходе ускоряемых объектов из одной ЛИСО в другую. В частности, неинерциальное замедление их собственных времён относительно мирового времени ГИСО, *абсолютно*, что известно из парадокса часов.

Принципиально важным с точки зрения физики является тот факт, что базисы, масштабы и часы всех ЛИСО, образующих неоднородную протяжённую систему отсчёта (НПСО), должны сосуществовать одновременно хотя бы в одной ГИСО при $t = const$ по времени этого ГИСО. При этом условии пространственные оси, образуемые совокупностью ЛИСО, проецируются на гиперповерхность $t = const$, а их временные оси проецируются на ось t. В результате, в этой совокупности ЛИСО появляется эффективная метрика, ведущая к неоднородным релятивистским эффектам ускорения, что является шагом к переходу к ОТО даже в плоском пространстве-времени.

Классическим наглядным примером этого является специфика описания явлений во вращающемся диске, отмеченный Эйнштейном ещё вначале создания ОТО. Здесь есть физически выделенная ГИСО - система покоя центра, так как в этой ГИСО диск аксиально-симметричен и описание предельно упрощается (переход к движущимся вдоль оси ГИСО сохраняет эту симметрию, но лишь усложняет описание, не меняя физических результатов). В каждый момент $t = const$ по времени ГИСО совокупность ЛИСО, мгновенно-сопутствующих частицам диска, образует НПСО. С точки зрения наблюдателей в ГИСО эффекты релятивистской кинематики в этой НПСО, сокращения масштабов вдоль окружностей и замедления собственных времён, тем сильнее, чем дальше от центра находится данная ЛИСО.

С точки зрения формализма ОТО то, что такая эффективная метрика возникает из-за релятивистских эффектов в НПСО, не является существенным. В ОТО важен сам факт существования нетривиальной метрики, ведущей к неоднородным релятивистским эффектам, независимо от физических причин, которые её породили. Это могут быть взаимные движения (включая ускорения) локальных элементов системы отсчёта на фоне плоского пространства-времени (неоднородные ИСО и неинерциальные системы

отсчёта), кривизна самого пространства-времени на фоне неподвижных элементов системы отсчёта, или обе физические причины вместе.

При изменении структуры пространства-времени из-за источника гравитации принцип эквивалентности позволяет описывать явления в системах отсчёта, покоящихся в гравитационном поле аналогично описанию явлений в ускоренно-движущихся системах отсчёта в отсутствии гравитации. В этом случае также имеется выделенная протяжённая система отсчёта, где покоится центр инерции источника гравитационного поля. Поэтому и здесь вводятся ЛИСО, но не движущиеся, а мгновенно покоящиеся относительно источника поля, в которых локальной группой преобразований также является $O(1,3)$. Затем из этих взаимно-покоящихся ЛИСО строится НПСО, тоже покоящаяся относительно источника поля, и в этой НПСО появляется уже не эффективная, а реальная метрика, соответствующая гравитационному полю.

Если ввести ещё и неоднородность в системе отсчёта из-за взаимного движения ЛИСО, входящих в НПСО, то метрика будет содержать вклады как гравитационного поля, так и кинематических эффектов из-за относительного движения ЛИСО.

ВСТО расширяет эту картину релятивистских эффектов, внося соответствующие изменения, связанные с наличием двух типов объектов и таких же двух типов базисов систем отсчёта, которые идут в разных направлениях оси времени, глобально и локально. Более детально эти изменения будут описаны в книге [10].

4.2. Уравнения поля и эффекты гравитации в время-симметричной ОТО

Компоненты метрики $g_{\mu\nu}$ и тензора энергии-импульса $T^{\mu\nu}$ не меняются при 4-инверсии, как и тензор и скаляр Риччи, в которые дифференциалы координат входят квадратично. Это значит, что уравнения Эйнштейна

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \kappa T_{\mu\nu}, \tag{38}$$

где $\kappa = 8\pi G / c^3$, также не меняются при 4-инверсии. Таким образом, в время-симметричной ОТО уравнения гравитационного поля и их решения, а также эффекты гравитации, в основном остаются прежними по сравнению с обычной ОТО.

Картина физических эффектов гравитации, однако, меняется из-за различий в кинематике в двух типах систем отсчёта. Гравитация в статическом случае проявляется как взаимное сближение обычных частиц, которые в начальный момент покоились. При рассмотрении этого процесса в «обратной» системе отсчёта начало и конец процесса переставляются и в результате наблюдается взаимное удаление этих частиц с противоположными импульсами в начальный момент, и будут удаляться до тех поря, пока не остановятся в тех точках, где будут мгновенно покоиться. Таким образом, один и тот же процесс в одной и той же статической метрике описывается в двух системах отсчёта с взаимно обратными начальными и конечными состояниями.

Мировые линии античастиц в гравитационных полях такие же, как и для обычных частиц, и поэтому при переходе к частицам отрицательной энергии они останутся теми же, а меняется лишь направление эволюции частиц вдоль этих же мировых линий перестановкой начальных и конечных мировых точек. В частности, статическая метрика по определению не зависит от хода времени и изменение направления оси времени меняет лишь направление прослеживания событий вдоль мировых линий.

Для гравитонов спиральность играет роль кирального заряда и гравитоны с противоположными спиральностями, как и фотоны, выступают как частица и античастица, к которым затем следует применить интерпретацию ЗШФ [9].

Приведённые в этой части статьи замечания являются предварительными и в дальнейшем будут корректироваться, так как расширение ОТО с переходом к локальной

группе $O(1,3)$ требует более обстоятельного рассмотрения, что будет приводиться в последующих публикациях, в частности, в книге [10].

5. Заключение

В релятивистской теории частицы отрицательной энергии, присутствующие в ковариантной формулировке, идут только назад во времени. Это свидетельствует о том, что теория дырок, где такие частицы предполагаются идущими вперёд во времени, не совместима с релятивистской теорией и уже поэтому является несостоятельной.

Последовательной трактовок таких состояний является интерпретация ЗШФ, в которой частицы отрицательной энергии идут назад в обычном времени и описывают античастицы положительной энергии, идущие вперёд во времени. Эта интерпретация ранее приводила к ряду противоречий из-за её непоследовательного применения, в основном из-за ограничения обычными ИСО K_+ с ортохронной группой Лоренца $O^{\uparrow}(1,3)$, не включающей инверсию оси времени.

При последовательном применении интерпретации ЗШФ необходимо включить системы покоя частиц отрицательной энергии, где измеряются их собственные времена. Такие системы отсчёта состоят из античастиц, которые в терминах частиц отрицательной энергии тоже идут назад во времени. Группой преобразований физических координат тогда становится общая группа Лоренца $O(1,3)$, включающая 4-инверсию. Включение трансляций начала координат ведёт к общей группе Пуанкаре. Такое расширение множества допустимых систем отсчёта ведёт к ВСТО, в которой как частицы, так и их системы покоя могут идти в обеих направлениях времени, но только в соответствие со знаком энергии. ВСТО снимает внутренние противоречия в квантовой теории при прежних частичных применениях интерпретации ЗШФ.

В время-симметричной СТО глобальные и локальные ИСО вводятся в плоском пространстве-времени с глобальной и локальной группами преобразований, а в время-симметричной ОТО также и в искривлённом пространстве-времени, где эта группа, действующая в ЛИСО, становится локальной.

В время-симметричной ОТО уравнения Эйнштейна не меняются, так как метрический тензор, тензор плотности энергии-импульса и тензор Риччи не меняют знак при 4-инверсии. Но ускорение меняет знак при 4-инверсии и при той же статической метрике кинематические эффекты гравитации оказываются асимметричными относительно отражения оси времени. Этот кинематический эффект связан с разным направлением прослеживания событий вдоль одних и тех же мировых линий.

В статьях 2 и 3 [9] будут изложены расширения согласно ВСТО соответственно релятивистской квантовой механики и квантовой теории поля. Более детальное изложение ВСТО и её применений к квантовой теории дано в книге [10].

Литература

1. Dirac P.A.M (1930) Proc. Roy. Soc. (L.) **A126**, 360
2. Зисман Г. (1940) ЖЭТФ **10** 1163; (1941) **11** 631; *Теор. античаст*. (дисс. сент.1941) 66 с.; Зисман Г., Тодес О. (1970) *Курс общей физики*. т. 3, Н.
3. Stueckelberg E. (1941) *Helv. Phys. Acta* **14**, 588.
4. Feynman R. (1949) *Phys. Rev*. **76**, 749.
5. Бьёркен Дж., Дрелл С. (1978) *Релятивистская квантовая механика*. М.
6. Greiner W. (1996) *Relat. Quant. Mech. Wave Eq*. Spr.
7. Гельфанд И., Минлос Р., Шапиро З. (1958) *Предст. группы вращ. и группы Лоренца*. Н.
8. Закир З. *Квант. и грав. физ.* (2023) **4**:026-8400; (2024) **5**:027-8433.
9. Закир З. *Квант. и грав. физ.* (2025) **6**:029-9129; (2026) **7**:030-9200.
10. Закир З. (2026) *Время-симметричные релятивистская и квантовая теории*. ЦТФА, Т.