

Локальная и глобальная теории относительности в плоском и искривлённом пространстве-времени

Захид Закир¹

Аннотация

Специальная и общая теории относительности состоят в описании как локальных, так и глобальных явлений – первая в плоском, а вторая в искривлённом пространстве-времени. В статье показано, что каждый из этих двух классов релятивистских эффектов, локальных и глобальных, универсален и является предметом отдельной теории. Во-первых, описания в локальных системах отсчёта, связанных локально-лоренцевыми преобразованиями, образуют локальную теорию относительности (ЛТО). Принцип локальности позволяет применять ЛТО к неинерциальным локальным системам, а принцип эквивалентности – в гравитационном поле. Во-вторых, описания в глобальных системах отсчёта, построенных из локальных систем отсчёта, сосуществующих на общей гиперповерхности одновременности, образуют глобальную теорию относительности (ГТО). ЛТО и ГТО основываются на физических координатах и дополняют друг друга, а специальная и общая теории относительности были гибридами из этих двух теорий. ЛТО и ГТО описывают локальные и глобальные свойства гравитации, отделяя эффекты поля и эффекты движения разными методами, в том числе в рамках биметрического формализма, где одна метрика описывает геометрию глобальных систем отсчёта, а другая – пространства-времени. Показано, что ГТО ведёт к картине коллапса с образованием фрозаров, а также ведёт к обрезанию петлевых интегралов квантовых полей на планковской длине. В ГТО модели космологии строятся на гиперповерхностях одновременности, где в красные смещения дают вклад как растяжение, так и эффект Доплера, а также учитывается абберация. Предсказано начальное фиолетовое смещение, снимающее парадокс двойного красного смещения, что ведёт к космологии с замедляющимся временем, которая согласуется с данными наблюдений.

Ключевые слова: преобразования Лоренца, релятивистские эффекты, неинерциальные системы, гравитация, кривизна пространства-времени, принцип локальности, принцип эквивалентности, квантовые поля в гравитационном поле, гравитационный коллапс, космология.

Содержание

Введение.....	1
1. ЛТО как описание событий в локальных системах отсчёта.....	3
2. ГТО как описание событий на гиперповерхностях одновременности.....	6
3. Описание явлений в гравитационном поле в рамках ГТО.....	11
Заключение.....	16
Литература.....	17

Введение

Физические явления в пространстве без гравитации принимают простейший вид в инерциальных системах отсчёта (ИСО) и они описываются специальной теорией относительности (СТО), которая хорошо подтверждена [1]. Явления же в неинерциальных системах отсчёта (НСО) и в гравитационном поле описываются общей

¹ *Центр теоретической физики и астрофизики, Ташкент Узбекистан, zzakir@ggph.uz*

теорией относительности (ОТО), но экспериментально подтверждена лишь часть формализма ОТО, связанная с физическими переменными в допустимой области их изменения [2].

ОТО, будучи сформулированной в излишне общей форме, включала и нефизические элементы, такие как произвольные координаты и поэтому при применениях ОТО к реальным системам с физическими координатами всегда надо было уточнять, какая её часть описывает реальные события, а какая нет [2]. В простых случаях это несложно, а при экстремальных условиях базовые понятия теории надо было приводить в соответствие физическими ограничениями СТО в окрестности каждой локальной системы. Но, так как обычно это не делалось, наивно доверяя всем следствиям формализма ОТО, то при описании явлений в сильных полях часто делались нефизические выводы. Поэтому задача отделения физической части формализма ОТО от нефизической была не просто методической, а фундаментальной проблемой, решение которой должно было превратить реалистичную часть ОТО в последовательную физическую теорию, всем следствиям которой можно будет доверять полностью.

Физическую часть ОТО же составляют в первую очередь положения, следующие из принципа эквивалентности, согласно которому в гравитационных полях локально справедлива СТО. Формализм же ОТО интерпретировался исходя из принципа общей ковариантности, допускающего произвольные протяжённые системы отсчёта, которые могли быть связаны локально-нелоренцевыми преобразованиями и состоять из локальных частей, существующих неодновременно.

В статье физическая часть ОТО формулируется в виде двух независимых частей. Первая часть – это описание в локальных системах отсчёта (ЛСО), связанных локально-лоренцевыми преобразованиями, а вторая часть – описание в глобальных системах отсчёта (ГСО), построенных из ЛСО на гиперповерхностях одновременности или в пространствах одновременных событий. Так как СТО имеет такую же структуру, то две аналогичные части СТО и ОТО объединены в две отдельные теории.

Во-первых, описание локальных явлений в ЛСО, из-за их универсальности, т.е. применимости как для инерциальных, так и для неинерциальных ЛСО как в плоском, так и в искривлённом пространстве-времени, формулируется как самостоятельная теория – *локальная теория относительности* (ЛТО). Во-вторых, описание с помощью ГСО тоже оказалось универсальным, имея силу как для инерциальных, так и неинерциальных ЛСО как в плоском, так и в искривлённом пространстве-времени, то и оно формулируется как отдельная теория, *глобальная теория относительности* (ГТО) [3].

В результате локальные части СТО и ОТО составили ЛТО, а глобальные их части образовали ГТО, т.е. фрагменты СТО и ОТО перераспределились, образуя две универсальные теории, каждая из которых описывает физические явления единым образом как в плоском, так и в искривлённом пространствах событий. При этом они дополняют друг друга, занимая промежуточное положение между СТО и ОТО. Первая, ЛТО, есть результат локализации СТО с учётом опыта такой локализации в ОТО, а вторая, ГТО, есть результат последовательной глобализации ЛТО с сохранением для протяжённых систем отсчёта ключевого глобального аспекта СТО – представления физической реальности, или мира, в виде совокупности одновременных событий.

Классическая механика в своё время также была переформулирована без изменения её физических основ – из формы ньютоновской механики приняла более универсальные формы лагранжевой и гамильтоновой механик, которые взаимно дополняли друг друга. ГТО как раз и объясняет преимущества гамильтоновой формы во многих областях физики тем, что времени в гамильтоновых формулировках придаётся смысл мирового времени, выражающего глобальную одновременность событий в одновременно сосуществующих частях ГСО.

В разделе 1 статьи ЛТО формулируется как теория, описывающая явления в окрестностях ЛСО. В разделе 2 ГТО формулируется как теория, описывающая явления в протяжённых системах отсчёта на гиперповерхностях одновременности. В разделе 3

рассмотрены эволюция протяжённых объектов, в частности квантовых полей и звёзд, в сильных гравитационных полях, рассмотрены также космологические следствия ГТО. Более детальное изложение ЛТО и ГТО и их применений приведены в книге [4].

Перечень сокращений: СО - система отсчёта, ЛСО - локальная СО, ГСО - глобальная СО, ИСО - инерциальная СО, НСО - неинерциальная СО, СТО - специальная теория относительности, ОТО - общая теория относительности, ЛТО - локальная теория относительности, ГТО - глобальная теория относительности.

1. ЛТО как описание событий в локальных системах отсчёта

А. Физика в инерциальных ЛСО.

Физические явления в плоском пространства-времени описываются СТО путём введения глобальных ИСО, но для описания событий в локальной окрестности частицы достаточно локально-инерциальных систем отсчёта или инерциальных ЛСО. Далее СТО, ограниченную ЛСО, будем называть ЛТО, которая, как будет показано далее, становится из-за этого ограничения более универсальной теорией, чем сама СТО, так как ЛТО применима также и для неинерциальных ЛСО и ЛСО в гравитационном поле.

В окрестности любой точки пространства можно ввести инерциальные ЛСО, относительные скорости которых могут отличаться величиной и направлением. Каждая из них состоит из базиса в виде пробной частицы малой массы, к которой прикреплена локальная тетрада. Тетрада есть четыре взаимно ортогональных единичных векторов в пространстве-времени $\mathbf{e}_i$ ($i = 0, 1, 2, 3$), которые с физической точки зрения есть три стандартных масштаба, образующих пространственную триаду, а также стандартные часы. Координаты вектора в пространстве-времени x^i вводятся как $\mathbf{x} = x^i \mathbf{e}_i$, где $x^0 = ct$ и идёт суммирование по повторяющемуся индексу. Событие, физическое явление в данной точке пространства в данный момент времени, есть мировая точка в пространстве-времени, а непрерывная цепочка событий, есть мировая линия.

Классическая механика основана на *принципе относительности*, согласно которому во всех ЛСО в данном месте физические законы имеют одинаковый вид. Обозначив скорость ЛСО K' относительно ЛСО K вдоль ос x как V , находим, что интервалы координат двух событий в двух ЛСО связаны преобразованиями Галилея: $dt' = dt$ и $dx = dx' - vdt'$.

Эксперименты показали необходимость дополнения классической механики *принципом постоянства скорости света* во всех ЛСО [1]. Это приводит к наличию в пространстве-времени инвариантных (светоподобных) изотропных линий:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = 0, \quad ds^2 = c^2 dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2 = 0, \quad (1)$$

Переход от одной ЛСО к другой, движущейся относительно первой, происходит тогда в виде поворота пространственной и временной осей координат навстречу друг к другу. В результате ось времени выступает не только как четвёртая координата, а делает пространство-время 4-мерным *псевдоевклидовым пространством*. Из двух форм описания такого пространства-времени, 1) $\mathbf{e}_0^2 = -1$, $\mathbf{e}_a^2 = 1$ и 2) $\mathbf{e}_0^2 = 1$, $\mathbf{e}_a^2 = -1$, где $a = 1, 2, 3$, удобным на практике оказывается второй, которым и будем пользоваться.

Как события, так и векторы, связывающие два события, являются инвариантами пространства событий. Инвариантный вектор интервала между близкими событиями $d\mathbf{x}$ может быть представлен через координаты двух ЛСО как $d\mathbf{x} = dx^i \mathbf{e}_i = dx'^i \mathbf{e}'_i$. С учётом ортонормированности базисных векторов в обеих ЛСО:

$$\mathbf{e}_0^2 = \mathbf{e}_0'^2 = -1, \quad \mathbf{e}_1^2 = \mathbf{e}_1'^2 = 1, \quad \mathbf{e}_0 \cdot \mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_0' \cdot \mathbf{e}_1' = 0, \quad (2)$$

для квадрата модуля $d\mathbf{x}^2$, обычно обозначаемого как ds^2 , получаем в двух ЛСО:

$$d\mathbf{x}^2 \equiv ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2 dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2 = \eta_{ik} dx^i dx^k, \quad (3)$$

где $\eta_{ik} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$, $i, k = 0, \dots, 3$. Поворот на угол χ на псевдоевклидовой плоскости (ct, x) даётся формулами:

$$c\Delta t = \Delta x' \sinh \chi + c\Delta t' \cosh \chi, \quad \Delta x = \Delta x' \cosh \chi + c\Delta t' \sinh \chi. \quad (4)$$

Для начала координат ЛСО K' $\Delta x' = 0$ и формулы (4) в этом случае дают $c\Delta t = c\Delta t' \cosh \chi$, $\Delta x = c\Delta t' \sinh \chi$. Это даёт выражение угла поворота χ и коэффициентов в (4) через относительную скорость V :

$$\tanh \chi = \frac{\Delta x}{c\Delta t} = \frac{V}{c}, \quad \sinh \chi = \frac{V/c}{\sqrt{1-V^2/c^2}}, \quad \cosh \chi = \frac{1}{\sqrt{1-V^2/c^2}}. \quad (5)$$

В результате, интервалы между координатами и временами двух близких событий связаны в двух ЛСО преобразованиями Лоренца:

$$dt' = \frac{dt - Vdx/c^2}{\sqrt{1-V^2/c^2}}, \quad dx' = \frac{dx - Vdt}{\sqrt{1-V^2/c^2}}, \quad dy' = dy, \quad dz' = dz. \quad (6)$$

Формулы, выражающие (t, x) через (t', x') такие же, как (6), но с заменой $V \rightarrow -V$.

Для скоростей частицы в двух ЛСО $v = dx/dt$ и $v' = dx'/dt'$ из (6) получаем формулу сложения скоростей, согласно которой скорость частицы в K не превысит c :

$$v = \frac{v' + V}{1 + v'V/c^2} < c, \quad (7)$$

Интервалы времени измеряются с помощью одномоментных событий. Измерение расстояний, т.е. сравнение их с эталоном длины, производится путём одновременной фиксации концов масштабов, т.е. фиксируя одновременные события. Но, так как в (6) $dt' \neq dt$, то разные ЛСО имеют разные гиперповерхности одновременности, что означает относительность одновременности событий. Это ведёт к релятивистским эффектам – замедлению собственных времён $d\tau$ и сокращению длин масштабов для движущихся объектов по сравнению с темпом времени и длинами в их системе покоя. Интервал собственного времени $d\tau$ частицы массы $m > 0$, определяемый как

$$ds^2 = c^2 d\tau^2 = c^2 dt^2 - d\mathbf{r}^2 > 0, \quad d\tau = dt \sqrt{1-V^2/c^2} \quad (8)$$

является инвариантом, а вещественные интервалы $ds^2 > 0$ времениподобные. Собственная длина dl_0 , определяемая как:

$$ds^2 = -dl^2 = c^2 dt^2 - d\mathbf{r}^2 < 0, \quad d\tau = dt \sqrt{1-V^2/c^2}, \quad dl = dl_0 \sqrt{1-V^2/c^2}. \quad (9)$$

также инвариантна и мнимые интервалы $ds^2 < 0$ пространственноподобные. Свойство интервалов быть светоподобным ($ds^2 = 0$), времениподобным или пространственноподобным инвариантно и не зависит от ЛСО.

Первым и наиболее широко используемым применением ЛТО является случай инерциальных ЛСО в плоском пространстве-времени без гравитации, когда эти ЛСО входят в состав глобальной ИСО.

Эволюция во времени частиц и полей даётся уравнениями движения, которые следуют из принципа наименьшего действия. Для свободной частицы он принимает вид:

$$S = -mc \int_{s_1}^{s_2} ds = \int_{t_1}^{t_2} L dt, \quad L = mc^2 \sqrt{1 - v^2 / c^2}. \quad (10)$$

В общем случае функция Лагранжа L может относиться к любой физической системе в окрестности ЛСО. Тогда из неё следуют уравнения движения или уравнения полей. 4-скорость u^i имеет свойства:

$$u^i = \frac{dx^i}{ds}, \quad u^0 = \frac{c}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}, \quad \mathbf{u} = \frac{\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}, \quad \eta_{ij} u^i u^j = -1. \quad (11)$$

Соответственно 4-импульс частицы есть $p^i = mu^i$, компонентами которого являются энергия и импульс $(E / c, \mathbf{p})$, при этом энергия покоя равна $E_0 = mc^2$.

В определении функции действия в (10) $L > 0$ при $t_2 > t_1$, но последовательность моментов времени и знак L в общем случае не определены. Здесь функция действия не меняется при одновременном изменении знаков L и интеграла (перестановкой пределов), что означает $L < 0$ при $t_2 < t_1$. Это свойство лежит в основе трактовки Штюкельберга-Фейнмана, где античастицы описываются как те же частицы, но с отрицательной энергией и идущие назад во времени. Для перехода к такой трактовке направление эволюции во времени в (10) зафиксируем введением ступенчатой функции, определяемой как $\theta(x) = 1$ и $\theta(-x) = 0$ при $x > 0$. Далее в (10) переставим пределы интеграла по времени, что изменит знак интеграла, но этот знак припишем $L \rightarrow -L$, и затем, переобозначив моменты времени во втором интеграле, получаем функцию действия для частиц отрицательной энергии, идущих назад во времени:

$$S = \theta(t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} L dt = \theta(t_2 - t_1) \int_{t_2}^{t_1} (-L) dt = \theta(t_1 - t_2) \int_{t_1}^{t_2} (-L) dt. \quad (12)$$

Введя ступенчатую функцию также и в (10), приходим к общему выражению для частиц и их античастиц положительной энергии, идущих только вперёд во времени, а затем античастицы заменим частицами отрицательной энергии, идущими назад во времени:

$$S = \theta(t_2 - t_1) \left(\int_{t_1}^{t_2} L dt + \int_{t_1}^{t_2} L dt \right) = \theta(t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} L dt + \theta(t_1 - t_2) \int_{t_1}^{t_2} (-L) dt. \quad (13)$$

Это и есть выражение для функции действия в трактовке Штюкельберга-Фейнмана [7], используемое в квантовой теории поля для совместного описания частиц и античастиц.

Итак, в ЛТО принцип относительности принимает форму локальной лоренц-инвариантности. То, как это достигается в конкретных физических условиях, будет рассмотрено ниже.

В. Физика в неинерциальных ЛСО. Принцип локальности.

В плоском пространстве-времени без гравитации имеются неинерциальные ЛСО, которые в первом приближении также описываются ЛТО. Это следует из того факта, что в этом приближении ускорение $\mathbf{a}$ локально не влияет на темп хода времени и на длины масштабов, а значит релятивистские эффекты, также как для инерциальных ЛСО, определяются только относительными скоростями (свойство локальности). Для слабых ускорений свойство локальности имеет место потому, что изменения в темпе времени и длине масштабов могут зависеть лишь от чётной степени ускорения $\mathbf{a}^2$, и ими можно

пренебречь, так как за малый интервал Δt (локальность во времени) их вклад в замедление времени будет иметь порядок малости Δt^2 .

При сильных ускорениях для свойства локальности нет таких прямых аргументов, но эксперименты не противоречат ему и поэтому, обобщая известные эксперименты, его называют *принципом локальности* [2]. Косвенным аргументом же является то, что в гравитационном поле имеется его аналог – *принцип эквивалентности*, который хорошо подтверждён на экспериментах (см. ниже). Учитывая эти обстоятельства, принцип локальности будем считать справедливым во всех неинерциальных ЛСО.

В таком случае две неинерциальные ЛСО в окрестности одного и того же события связаны между собой в первом приближении локально-лоренцевыми преобразованиями и в них имеет место локальная лоренц-инвариантность. Для упрощения ситуации часто вводятся сопутствующие инерциальные ЛСО, когда локальная лоренц-инвариантность очевидна. Для них локальность означает и во времени, т.е. за время сопутствия.

Итак, благодаря принципу локальности ЛТО справедлива в первом приближении и в неинерциальных ЛСО, что позволяет описывать локальные явления в таких СО теми же соотношениями, что и в инерциальных ЛСО.

С. Физика в ЛСО в гравитационном поле. Принцип эквивалентности

Явления в ЛСО, покоящейся в гравитационном поле, происходят также, как и в неинерциальном ЛСО, движущейся с ускорением, равным по модулю, но направленным противоположно гравитационному ускорению. Этот подтверждённый экспериментами факт составляет основу *принципа эквивалентности* [2].

Из принципа эквивалентности следует, что для ЛСО в гравитационном поле, как и в неинерциальных ЛСО, в первом приближении справедлива локальная лоренц-инвариантность, а значит в этом же приближении справедлива и ЛТО. Это позволяет описывать локальные явления в гравитационном поле теми же соотношениями, что и в инерциальных ЛСО.

Д. ЛТО как универсальная теория и переход к ГТО

Итак, хотя ЛТО есть лишь локализованная форма СТО, тем не менее, в отличие от СТО в целом, она применима как в неускоренных, так и в ускоренных ЛСО, при этом как в плоском, так и в искривлённом пространстве-времени. Дело в том, что СТО состояла из двух частей – локальной части, которая универсальна и поэтому может фигурировать как отдельная теория, ЛТО, и глобальной части, которая ограничена только инерциальными СО в плоском пространстве-времени.

В следующем разделе будет показано, что эта глобальная часть СТО также должна стать частью другой универсальной теории, ГТО, применимой как для протяжённых НСО, так и для ГСО в гравитационном поле. ГТО, в отличие от ЛТО, имеет дело с более сложными системами, а её формализм является более обширным и поэтому ниже будут приведены лишь основные положения и результаты, а более детальное изложение будет дано в последующих публикациях и в книге [4].

2. ГТО как описание событий на гиперповерхностях одновременности

А. Физика в глобальных ИСО в плоском пространстве-времени, ГТО в форме СТО.

В ЛТО в окрестности каждой точки пространства вводятся семейства ЛСО и локальные события описываются в терминах локальных пространственных координат и локальных собственных времён одной из ЛСО в данном месте. Это значит, что в рамках ЛТО в точке А задаётся «А-время» одной из ЛСО, а в точке В, находящейся вне близкой окрестности А, задаётся «В-время» другой ЛСО, но не определено общее для А и В «время» [1]. Также обстоит дело и с определением длин стандартных масштабов.

Рассмотрим поэтому общие для двух ЛСО в А и В определения времён и длин. Для этого в одной точке, выбранной как начало координат, в начальный момент времени, т.е. в событии O , выберем одну из ЛСО в этой точке как базовую, а затем из каждого семейства ЛСО в других точках выберем по одному ЛСО в момент, одновременный с событием O с точки зрения наблюдателя в базовом ЛСО. В другие моменты повторим ту же процедуру. Если в каждый момент времени в такой совокупности из одновременно сосуществующих в разных точках ЛСО все соседние стандартные часы будут взаимно синхронизованы (эйнштейновской синхронизацией), а соседние пространственные триады, состоящих из стандартных масштабов, непрерывно соединены и пронумерованы, то тем самым эта конструкция образует ГСО. Даже если синхронизация будет нарушена через небольшое время, хотя бы в это время мы будем иметь дело с ГСО, а в другие моменты можно повторять ту же процедуру, восстановив ГСО в прежнем виде.

Физическая система координат в пространстве при этом формируется с использованием свойств симметрии физической системы, описываемой данной ГСО. Пространство без учёта влияния полей и частиц является однородным и изотропным и эти симметрии пространства выражает декартова система координат. Но, если в физической системе есть сферическая симметрия, то строится сферическая система и т.д.

Вводя ГСО, мы тем самым выходим за пределы ЛТО и теорию, описывающую события путём введения ГСО, далее будем называть ГТО. В рамках ГТО в каждой из ГСО физическая реальность предстаёт как совокупность частиц и полей, мгновенно сосуществующих на гиперповерхностях одновременности базовой ЛСО.

Событие, т.е. мировая точка O , можно выбрать как начало координат, от которой отходят световые конусы в прошлое и будущее. События в и на этих световых конусах находятся в абсолютном прошлом или абсолютном будущем относительно настоящего, события O . События вне двух ветвей светового конуса происходят в другой точке пространства и являются абсолютно удалёнными от O . Релятивистская причинность состоит в том, что два события могут быть причинно связаны только если интервал между ними времениподобный (внутри светового конуса) или светоподобный. Для таких событий понятия «раньше» и «позже» имеют абсолютный смысл и это позволяет однозначно определить понятия причины и следствия.

Первым и наиболее часто используемым применением ГТО является случай плоского пространства без гравитации, когда из ЛСО образована глобальная ИСО. Инерциальные ЛСО в разных местах глобальной ИСО взаимно неподвижны и поэтому для локальности ЛСО достаточно ограничения малой областью пространства, а ограничение во времени необязательно. При этом принцип относительности и принцип постоянства скорости света справедливы в глобальной форме, т.е. законы физики, включая постоянство скорости света, одинаковы во всех глобальных ИСО. Таким образом, ГТО в данном простейшем случае ИСО в плоском мире сводится к СТО. Принцип относительности здесь принимает форму *глобальной лоренц-инвариантности*. Однородность пространства и времени ведёт к трансляционной инвариантности, что означает добавление начальных значений x_0^i для координат базовой инерциальной ЛСО K (либо K'), после чего группой симметрии становится группа Пуанкаре:

$$x'^i = \Lambda_k^i x^k + x_0^i. \quad (14)$$

В ЛТО замедление времён и сокращение длин в движущихся локальных ИСО были результатами проецирования на гиперповерхность одновременности покоящейся ЛСО. В глобальной ИСО ситуация такая же, но теперь уже глобально.

Рассмотренная глобальная конструкция СТО - ГСО на гиперповерхности одновременности базовой ЛСО, оказывается более универсальной, чем сама СТО. Будучи применимой как для неинерциальных ГСО, так и для ГСО в гравитационном поле и эта конструкция лежит в основе ГТО, теории также универсальной, как и ЛТО.

В. Физика в протяжённых ИСО в плоском пространстве-времени

В плоском пространстве-времени из совокупности неинерциальных ЛСО можно образовать протяжённую *неинерциальную* СО (НСО). С одной стороны, у таких ЛСО, образующих протяжённую НСО, не будет общей гиперповерхности одновременности. Но, с другой стороны, условия причинности включают требование, чтобы протяжённая НСО, как объединение локальных объектов, включала лишь такие ЛСО, которые сосуществуют одновременно.

В плоском пространстве-времени это требование причинности, об одновременном сосуществовании ЛСО в составе НСО, выполняется при построении протяжённой НСО на гиперповерхности одновременности одной из глобальных ИСО, выбранной как базовая [5]. Пространственно-временной интервал между двумя близкими событиями, измеренный стандартными часами и стержнями базовой ИСО, имеет вид:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^a dx_a = \gamma_{ik} dx^i dx^k. \quad (15)$$

Здесь «плоская» метрика $\gamma_{ik} = (1, \gamma_{ab})$ базовой ИСО включает в себя 3-метрику γ_{ab} криволинейных координат и ведёт к нулевому тензору кривизны, т.е. эта ИСО адекватно выражает геометрию плоского пространства-времени.

Если один из двух стандартных часов испытывает ускорение, то при их повторной встрече часы, испытавшие ускорение, будут отставать от неускоренных абсолютно, так как пространственно-временной интервал вдоль не прямой мировой линии меньше, чем у прямой мировой линии. Частными случаями таких абсолютных замедлений времени являются осцилляции и флуктуации частиц, когда их собственные времена замедляются необратимо по сравнению со временем системы покоя центра инерции системы. Более того, любые замедления времени при даже кратковременном ускорении вносят элемент необратимости. Поэтому неинерциальное замедление времени, которое абсолютно, как и ускорение, нельзя смешивать с инерциальным замедлением, которое относительно.

Далее учтём, что для каждой из неинерциальных ЛСО в составе протяжённой НСО локально справедлив ЛТО, что следует из принципа локальности. Поэтому элементами протяжённых НСО являются только такие ЛСО, которые связаны между собой локально-лоренцевыми преобразованиями и сдвигами. Интервал, измеренный стандартными часами и стержнями ЛСО протяжённой НСО, будет аналогичен (15):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^{a'} dx_{a'}. \quad (16)$$

Следующим шагом является проецирование пространственных осей всех ЛСО на гиперповерхность $t = \text{const.}$ базовой ИСО. При этом стандартные масштабы и часы этой ИСО считаем эталонными, выражая через них стандартные масштабы и часы НСО. Связь между их малыми интервалами линейная:

$$cdt = e_0^{0'} cdt + e_a^{0'} dx^a, \quad dx^{a'} = e_a^{a'} dx^a + e_0^{a'} cdt, \quad (17)$$

и пространственно-временной интервал (16) выражается в координатах базовой ИСО:

$$ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 + 2g_{0a} cdt dx^a + g_{ab} dx^a dx^b = g_{ik} dx^i dx^k. \quad (18)$$

Здесь коэффициенты 4-метрики определены через γ_{ik} в виде:

$$g_{ik} = \gamma_{i'k'} e_i^{i'} e_k^{k'}. \quad (19)$$

Описание одних и тех же событий в протяжённой НСО, тем самым оказывается зависящим от выбора базовой ИСО, что делает введение таких НСО неоднозначной процедурой. Однако, эта неоднозначность такая же, как в СТО, где при пространственно-подобном интервале одновременность двух событий относительна. Гиперповерхности одновременности разных базовых ИСО связаны между собой преобразованиями из группы Пуанкаре и поэтому координаты событий в двух протяжённых НСО на их базе

также будут связаны аналогичным образом. А именно, в координаты (dt, dx^a) преобразуются при переходе от одной протяжённой ИСО к другой (с другим ускорением их ЛСО) вместе с преобразованием метрики g_{ik} , но эти преобразования будут состоять из локальных лоренц-преобразований между ЛСО и сдвигов. Возможны и параметризации, которые не меняют конфигурацию ЛСО, но они не меняют физическую картину и при описании физических явлений играют лишь вспомогательную роль.

Здесь метрика ИСО g_{ik} зависит, кроме конфигурации криволинейных координат базовой ИСО, также и от того, какие силы ускоряют ЛСО данного ИСО и скоростей из-за ускорения начиная с момента t_0 . Появление релятивистских сокращений масштабов и замедления собственных времён часов ускоренных ЛСО относительно базовой ИСО определяют нетривиальную связность и кривизну, которые выражаются через метрику g_{ik} и её производные [5]. Наличие двух метрик – метрики базовой ИСО γ_{ik} и метрики протяжённой ИСО g_{ik} позволяет далее использовать биметрический формализм [6] и получать соответствующие связности и тензор кривизны при описании пространства событий с помощью ГСО в форме протяжённой ИСО. При этом кривизна пространства-времени равна нулю, тогда как кривизна ГСО отлична от нуля при наличии поля ускорений ЛСО входящих в ИСО.

Итак, для построения ГСО в плоском пространстве-времени, соответствующей протяжённой ИСО, положения ЛСО, входящих в её состав, необходимо фиксировать одновременно в момент $t = \text{const.}$ по времени базовой ИСО K , считая эталонными масштабы и часы K . Построение таких ГСО из ЛСО на гиперповерхности одновременности базовой ИСО, таким образом, составляет последовательный с физической точки зрения способ глобализации ЛТО. При описании системы частиц естественным с физической точки зрения является выбор как базовой ИСО, где покоится центр инерции системы частиц, а при описании явлений в некоем поле – ИСО, где покоится центр инерции источника поля. Это позволяет корректно выйти за пределы ИСО, описывая физические явления также и в протяжённой ИСО, что и позволяет выделить физическую часть ОТО. Для сферически-симметричной физической системы выделенной глобальной ИСО является та, где покоится её центр симметрии, поскольку только в ней система остаётся сферически-симметричной, а во всех остальных будет выглядеть эллипсоидальной из-за сокращения длин вдоль относительной скорости.

Отметим, что формализм ОТО, основанный на принципе общей ковариантности, допускал использование произвольно движущихся ЛСО, при этом как в плоском, так и в искривлённом пространстве-времени. Но многие из них были нефизическими, т.е. физически нереализуемыми, так как не могли быть связаны с физически реализуемыми ЛСО локально-лоренцовыми преобразованиями. В плоском пространстве-времени есть возможность однозначным образом ограничить формализм ОТО совокупностями только тех ЛСО, которые физически реализуемы, т.е. соответствуют ЛТО, и поэтому могут входить в состав ГСО, объединяющей одновременно сосуществующие ЛСО.

Далее такая же последовательная физическая трактовка будет использована и для описания событий в гравитационном поле.

С. Физика в ГСО покоящихся в гравитационное поле

ГТО в плоском пространстве-времени в случае неинерциальных ГСО опирается на два факта, связанных с физическими свойствами систем с ускорениями. Во-первых, ГСО образуется из совокупности ЛСО, одновременно сосуществующих в данный момент времени базовой ИСО, т.е. построена на её гиперповерхности одновременности. Второй факт – это справедливость в этих ГСО принципа локальности, выражаемой локальной лоренц-инвариантностью, ограничивающей принцип общей ковариантности ОТО, оставляя лишь ЛСО, связанные локально-лоренцевыми преобразованиями.

В искривлённом пространстве-времени ГТО как физическая часть ОТО должна привести к теории гравитации. Как и в ОТО, в ГТО исходим из принципа, обобщающего экспериментальные факты, принципа эквивалентности, в соответствии с которым явления в ЛСО, *покоящейся в гравитационном поле*, эквивалентны явлениям в ЛСО *движущимся с ускорением* в плоском пространстве-времени [2]. Из этого принципа следует, что в гравитационном поле, как и в ускоренных ЛСО, локально справедлива ЛТО, а значит соседние ЛСО *покоящиеся* в гравитационном поле, связаны между собой локально-лоренцевыми преобразованиями. Пространственно-временной интервал в гравитационном поле поэтому имеет такой же вид, как и в (16):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^{a'} dx_{a'}. \quad (20)$$

Хотя в гравитационном поле нет протяжённых ИСО, тем не менее ГСО можно построить на гиперповерхности одновременности удалённой ИСО, где покоится источник поля.

Итак, в ГТО для учёта влияния собственно гравитации нет нужды в движущихся ЛСО и достаточно совокупности ЛСО покоящихся относительно источника поля, где эффекты гравитации проявляются в чистом виде без кинематических искажений. Начнём поэтому с построения ГСО на базе системы покоя центра инерции источника поля.

Простейшими являются случаи статических полей, где световой сигнал проходит между двумя точками в прямом и обратном направлениях за один и тот же интервал времени. Это даёт возможность синхронизации координатных (или мировых) часов по эйнштейновской процедуре, после чего они везде будут показывать одинаковое время, время удалённой ИСО или *мировое время* t . Совокупность синхронизованных и взаимно покоящихся мировых часов определяет гиперповерхность одновременности. Далее, обычно в полях с определённой симметрией есть поверхность или хотя бы линия вне источника, вдоль которой стандартные масштабы либо остались такими же, как и в удалении, т.е. не подверглись влиянию гравитации, либо это влияние легко учесть.

В сферически-симметричном поле это имеет место вдоль 2-сфер вокруг центра и это позволяет ввести шварцшильдские координаты t, r, φ, θ . При вращающемся источнике стандартные масштабы вдоль оси вращения не имеют кинематических искажений, а влияние гравитации аналогично сферическому случаю и поэтому и здесь можно ввести аналог шварцшильдских координат с заменой сферических на сфероидальные координаты (координаты Бойера-Линдквиста). Если длины стандартных масштабов, подвергшихся влиянию гравитации, выразить через именно этот, не изменившийся масштаб, также как и в (17), то ситуация будет аналогичной неинерциальной ГСО в плоском пространстве времени, но теперь сокращения стандартных масштабов и замедление собственных времён происходят не из-за движения в плоском пространстве-времени, а из-за покоя в искривлённом пространстве-времени, т.е. в гравитационном поле.

Пространственно-временной интервал при этом принимает такой же вид, как и в (18), а в статическом случае при этом можно исключить недиагональную метрику:

$$ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 + g_{ab} dx^a dx^b = g_{ik} dx^i dx^k. \quad (21)$$

В общем случае нестатических гравитационных полей задание гиперповерхности одновременности не так прост, хотя и возможен. Для этого мировые линии частиц протяжённого объекта, параметризованные собственным временем τ и мировым временем t , получаем из решений уравнений поля для метрики и уравнений движения для частиц, а затем вдоль мировых линий определяем события, отмеченные одинаковыми значениями t , и определяем структуру вещества на гиперповерхности одновременности $t = \text{const}$. В следующем разделе это будет показано на примере некоторых наиболее важных физических систем, где гравитация доминирует.

Таким образом, ГТО в системе покоя источника гравитационного поля можем сформулировать на базе формализма ОТО, где временная координата x^0 является не

произвольным параметром, а мировым временем t ГСО, т.е. $x^0 = ct$. Уравнения для гравитационного поля, т.е. уравнения Эйнштейна, выводятся также как в ОТО, из соответствующей функции действия. Определение энергии поля в ГСО с $t = \text{const.}$ физически корректно и поэтому в ГТО нет проблемы с энергией гравитационного поля.

В отличие от ОТО, в ГТО пространственно-временные координаты остаются физическими, а преобразования между разными ГСО производятся как цепочка локально-лоренцевых преобразований между соответствующими ЛСО. В то же время остаётся возможность формальной репараметризации физических координат и метрики в гравитационном поле, аналогичной каноническим преобразованиям, что ранее в ОТО воспринималось всерьёз как переход к произвольным системам отсчёта.

Итак, ГТО как ОТО в физических координатах, заданных на гиперповерхности одновременности базовой ЛСО, сохраняет физическую часть ОТО, включая все экспериментально наблюдаемые следствия, и исключает нефизическую часть ОТО.

Д. Физика в ГСО движущихся в гравитационном поле

Переход к движущимся ГСО в гравитационном поле производится путём преобразований группы Пуанкаре для ИСО вдали от источника и локально-лоренцевых преобразований и сдвигов в окрестностях и внутри источника для перехода на новую гиперповерхность одновременности с новым мировым временем $t \rightarrow t'$.

При этом прежняя статическая метрика становится нестатической, что усложняет ситуацию с синхронизацией мировых часов. Если в случае однородного поля всё ещё остаются некие возможности сохранения простоты синхронизации, то уже для других конфигураций, таких как сферическая или аксиальная симметрия, такие преобразования настолько усложняют описание, что нет смысла их делать для одиночного источника.

Совершенно другой является ситуация для двойного источника, особенно, когда два источника вращаются вокруг общего центра инерции. Здесь ГСО с его мировым временем следует строить именно в системе покоя центра инерции двойной системы и создаваемое ими стационарное поле тогда описывается аналогом метрики Керра.

Итак, на практике введение движущихся ЛСО вокруг центра инерции источника относится к ЛТО и имеет лишь сугубо локальный смысл, тогда как гравитационное поле в целом и в чистом виде описывается лишь в ГСО, покоящихся относительно этого центра. В других случаях необходимо выделять из полной метрики кинематические искажения и лишь затем делать выводы о структуре поля и вещества, что, значительно усложняя описание и расчёты, даст в конечном итоге ту же физическую картину, которая следовала бы из описания в ГСО, покоящемся относительно центра инерции источника.

3. Описание явлений в гравитационном поле в рамках ГТО

При описании физических явлений в гравитационном поле в ОТО использовались гамильтонова формулировка, формулировка задачи Коши, а также разные виды биметрического формализма, где производилось разделение пространства событий на пространство и время [5,6]. При таких выделениях гиперповерхностей формализм ОТО переносится в ГТО, если это есть гиперповерхность одновременности, а временная координата есть мировое время на этой гиперповерхности.

Примеры такого описания в слабых полях хорошо известны, в частности при описании наблюдаемых эффектов и гравитационных волн. Поэтому далее приведём лишь некоторые новые примеры трактовки явлений в сильных полях, когда описание на гиперповерхностях одновременности существенно меняет физическую картину, а также ведёт к исключению ряда недоразумений и ошибок в прежних трактовках.

А. Гравитационная регуляризация квантовых полей.

В стандартной формулировке квантовой теории поля имеются ультрафиолетовые расходимости поправок высших порядков теории возмущений, описываемые петлевыми

диаграммами. Регуляризация петлевых интегралов на конечных расстояниях (и энергиях), когда поправки к массам и зарядам ещё малы и ряды теории возмущений сходятся, позволило описывать с большой точностью все известные эксперименты. Проблема поэтому была в нахождении физического механизма, который делает регуляризации конечными, чтобы поправки к массам и зарядам так и остались малыми.

В статье [7] было показано, что такой механизм есть и это - гравитационное замедление времени, один из подтверждённых на эксперименте базовых эффектов ОТО. Стандартная формулировка квантовой теории поля включала кванты большой энергии, но не учитывала их гравитацию, а в попытках же учёта гравитации она считалась лишь одним из полей. Но внешнее гравитационное поле квантов ещё и замедляет локальные собственные времена относительно мирового времени t удалённых наблюдателей.

В результате, на планковской длине, которая есть гравитационный радиус квантов планковской энергии, все процессы застывают в терминах мирового времени удалённых наблюдателей и поэтому не дают вклада в вероятности процессов физики частиц. Застывание же квантовых флуктуаций означает предельно сильное красное смещение частот вплоть до их зануления, т.е. учёт эффектов гравитации квантов ведёт к гравитационной регуляризации петлевых диаграмм на планковской длине.

Нелинейность полей усиливает гравитационные эффекты, а это значит, что застывание начнётся при ещё больших расстояниях, что ещё сильнее подавляет вклады больших энергий. Конечность поправок высших порядков теории возмущений на малых расстояниях делает состоятельными и модели с неперенормируемыми полями, если поправки малы на планковской длине. Это и имеет место для калибровочных полей и квантовой гравитации, где инвариантное обрезание интегралов при планковской длине (или энергии) даёт верхние пределы для петлевых поправок, которые оказались малыми и поэтому в этих теориях теория возмущений сходится.

Таким образом, квантовой теории поля стала конечной и состоятельной при её приспособлении к уже известным и хорошо подтверждённым принципам физики, требования которых должны были быть учтены с самого начала. В связи с этим отпала необходимость в поиске и проверке весьма радикальных гипотез и это значительно упрощает и существенно оздоравливает ситуацию в физике частиц.

В. Коллапс пылевой оболочки и однородной пылевой звезды.

Физическая картина коллапса звёзд в рамках ГТО была изложена в статьях [8,9]. Главное здесь то, что части звезды как протяжённого объекта должны сосуществовать одновременно, т.е. задаваться на гиперповерхности одновременности $t = const.$, сшитой на поверхности с гиперповерхностью одновременности внешней области.

Ньютоновская картина коллапса звёзд была простой: если масса коллапсирующей звезды больше нескольких масс Солнца, то её поверхность пересекает гравитационный радиус звезды со скоростью света и с ещё большей скоростью падает в центр, где вместе с остальным веществом звезды образует сингулярность, бесконечно плотное состояние.

В ГТО же гравитационное замедление локальных собственных времён τ по отношению к t ведёт к другой картине эволюции поверхности звезды. В терминах t поверхность застывает вне гравитационного радиуса и никогда не достигнет его, при этом вблизи гравитационного радиуса τ практически застывает. Мировые линии частиц поверхности в терминах t описывают каждый момент их существования в реальном мире и поэтому дают полную картину эволюции этих частиц, также как и поверхности в целом. Эта трактовка привела к теории фрозаров (frozar от frozen star, застывшая звезда), которая описывает картину полного застывания структуры звёзд в терминах t .

Образование фрозара ясно видно в процессе коллапса тонкой пылевой оболочки. Оболочка в терминах t застывает вне своего гравитационного радиуса, её внутренность остаётся плоской, а пробные частицы внутри неё застывают там, где они оказались перед застыванием оболочки. Оболочка превращается в *полый фрозар*, объект, полностью

застывший из-за своей сильной гравитации. Полый фрозар не имеет «горизонта событий», так как оболочка застыла вне гравитационного радиуса, нет и сингулярности в центре, так как внутренняя область осталась пространственно-плоской и там нет частиц оболочки. Уравнения движения дают мировые линии частиц оболочки для любого момента $t < \infty$, в каждый момент оболочка остаётся вне гравитационного радиуса, а область занятая оболочкой становится *местом, где ничего не происходит*.

Звезда - это протяжённый объект, совокупность одновременно сосуществующих частиц и полей, и поэтому её структура в целом определяется без кинематических искажений лишь в системе покоя её центра инерции. Вне сферической звезды её гравитационное поле статическое, а для внутренних слоёв звезды решения уравнений поля и уравнений движения позволяют связать собственные времена частиц в слоях с собственным временем на поверхности. Отобрав вдоль мировых линий частиц слоёв те значения τ , которые отвечают событиям, одновременным с поверхностью, можно описать мгновенную структуру звезды в соответствующий момент t .

В случае сферической пылевой звезды, плотность которой локально однородна, а частицы падают радиально с параболической скоростью, точное решение уравнений Эйнштейна было найдено в 1939 Оппенгеймером и Снайдером (ОС). Решение ОС состояло в преобразовании локального решения Фридмана в терминах τ (в форме Толмана) в глобальное решение в терминах t и описывало глобальную структуру пылевой звезды как совокупности одновременных событий. Позже точные решения для эллиптической скорости были найдены двумя другими методами О. Клейном (1961) и С. Вайнбергом (1972). Полное решение задачи коллапса однородной пылевой звезды этими тремя методами (ОС, Клейна и Вайнберга) для трёх выделенных скоростей (параболической, эллиптической и гиперболической с $k = 0, \pm 1$) было дано в [8,9] и приняло форму теории фрозаров, предсказавшей ряд наблюдаемых эффектов.

Эти точные решения показали, что в терминах t застывает не только поверхность звезды, но и весь её объём. Центр звезды застывает раньше других слоёв, после чего застывание быстро достигает поверхности и застывает вся структура звезды. Это значит, что гравитационное замедление времени и есть физический механизм останавливающий коллапс в терминах t . Каждый из внутренних слоёв застывает при своём эффективном гравитационном радиусе, создаваемом веществом внутри этого слоя (с учётом влияния внешних слоёв). Перед застыванием плотности достаточно массивных звёзд ниже чем у нейтронной звезды и поэтому, если они не взорвались до этого, то коллапс таких звёзд происходит аналогично пылевой звезде с образованием фрозара.

Итак, коллапс звёзд в ГТО в любой конечный момент t , времени внешнего мира, приводит к фрозару, объекту с почти однородной и практически застывшей внутренней структурой. Фрозар – это звезда с поверхностью вне гравитационного радиуса, внутренняя структура которой застыла в состоянии, в каком была перед застыванием. Фрозары не имеют горизонта и сингулярности и ведут к ряду наблюдаемых эффектов, а область пространства, занимаемая ими, есть «место, где ничего не происходит».

В отличие от нейтронных звёзд, при падении вещества на фрозар не будет вспышки излучения так как около поверхности вещество и процесс его падения быстро застывают. Поэтому для внешнего наблюдателя падение вещества на фрозар будет очень «тихим». Это и ряд других свойств фрозаров согласуется с наблюдаемыми свойствами известных компактных объектов, которые являются «кандидатами в фрозары».

Собственное время частицы на поверхности вращающейся звезды замедлено по отношению к t как гравитационно, так и кинематически, при этом нерадиальная часть скорости этих частиц максимальна на экваторе и равна нулю на полюсах. Локальная скорость частиц поверхности лишь асимптотически приближается к скорости света в любой конечный момент t . Поверхность застывает, будучи сплюснутым эллипсоидом, застывают также процессы во внутренних слоях, и звезда превращается в *фрозар с*

угловым моментом. В результате, в статической системе отсчёта поверхность фрозара с угловым моментом перестаёт сжиматься радиально, оставаясь за пределами внешнего гравитационного радиуса метрики Керра, ранее считавшегося внешней границей эргосферы. Смысл же этой границы оказывается в том, что здесь локальная скорость частиц поверхности достигла бы скорости света. Поскольку метрика внутри такого фрозара задаётся материальным решением и не является метрикой Керра, то такой фрозар не имеет эргосферы. В результате не будет эффектов, связанных с возможным существованием эргосферы, таких как извлечение энергии вращения при попадании частиц в эргосферу путём последующего высвобождения.

Акрецирующее на фрозар вещество, падая почти радиально, быстро застывает на поверхности, а поперечный размер участка падения не растёт и вещество сплющится радиально без растекания по поверхности. Это ведёт к неоднородности на поверхности фрозара, аналогичной массивным аномалиям (масконам) на поверхности Луны. При падении вещества из диска неоднородность максимальна вблизи экватора. В случае радиального падения нейтронной звезды на более массивный фрозар, нейтронная звезда сплющится и застынет на поверхности фрозара в виде тонкой локальной «причёски», крупного маскона. Также возможен взрыв нейтронной звезды из-за поперечного сжатия при падении на фрозар, что может привести к наблюдаемой мощной вспышке. Наличие неоднородного ландшафта отличает фрозары от белых карликов и нейтронных звёзд.

Неоднородность распределения вещества на поверхности, т.е. неоднородный ландшафт, приводит к неоднородностям гравитационного поля фрозара над этими областями, которые ведут к наблюдаемым эффектам. Их можно обнаружить с помощью методов гравиметрии, а также неровностей красных смещений вещества вокруг фрозара, а также по отклонениям в тени фрозара. Наблюдаемы также возмущения красных смещений и орбит объектов вокруг фрозара, включая дополнительные прецессии орбит и неоднородности диска. Вариации яркости диска из-за неоднородной структуры фрозара возможно удастся отделить от других вкладов, особенно для сверхмассивных фрозаров, у которых такие структурные аномалии будут сильными.

В ньютоновской теории при слиянии двух компактных сферических объектов образуется более массивный компактный объект, который также почти сферический. Однако, в ГТО два или более фрозара при сближении не смогут слиться и застывают на некотором расстоянии друг от друга, образуя застывший кластер из двух или более фрозаров. Если два фрозара равной массы радиально падают к общему центру инерции, то, поскольку гравитационный радиус системы вдвое больше гравитационного радиуса каждого из фрозаров, поверхность каждого из фрозаров остаётся вне гравитационного радиуса системы из-за застывания всех процессов, включая падение, в терминах t . Таким образом, в ГТО два фрозара не могут слиться и происходит только их слипание. Такая же ситуация, ещё более наглядная, имеет место и для трёх и четырёх симметрично расположенных фрозаров, когда гравитационный радиус системы примерно в три-четыре раза больше гравитационного радиуса каждого из фрозаров. Застывший кластер фрозаров при этом образует гравитационный кристалл, где расстояния между фрозарами в несколько раз превышают размеры каждого из них. Слипание фрозаров образует наиболее крупную неоднородность в кластере из фрозаров и приводят к наблюдаемым эффектам, более сильным, чем эффекты, связанные с масконами на поверхности. При этом слипание двух фрозаров приводит к более короткой и слабой вспышке всех видов излучения, включая гравитационные волны, чем при слиянии.

При квантовых флуктуациях полей в статическом гравитационном поле мировые линии частиц обычные как внутри, так и на поверхности звезды. При этом энергия виртуальной пары частица-античастица положительная. Поэтому в ГТО не происходит квантового рождения реальных пар частиц из вакуума в поле статического фрозара. Но при вакуумных флуктуациях квантовых полей в окрестности фрозара в присутствии термостата или внешнего поля один из квантов пары может упасть на фрозар, а другой может покинуть его окрестности. В этом случае застывание части квантовых флуктуаций

в фрозаре ведёт к появлению эффективной энтропии и температуры. Но, в отличие от гипотезы «квантового испарения» сколлапсировавших объектов, при таком рождении частиц за счёт энергии внешних полей масса фрозара растёт из-за поглощения частиц положительной энергии. Поэтому в этих случаях речь должна идти не об «испарении», а о «конденсации» на фрозаре остатков пар частиц.

С. Релятивистская космология в локальных и глобальных масштабах.

В релятивистской космологии был ряд проблем, которые не только оставались нерешёнными, но и не осознавались как проблемы. ГТО позволяет выявить их, что далее позволяет найти и пути для их решения. В частности, в основе фридмановских моделей лежит предположение о постоянстве темпа собственных времён в ходе расширения. Поэтому из-за необходимости совместного учёта вкладов растяжения длин волн и эффекта Доплера, возникает *парадокс двойного красного смещения* [10].

В *статическом* пространстве фотоны от удаляющихся от нас источников придут к нам с *доплеровским* красным смещением. При этом в нашей системе покоя это смещение имеется уже вначале и далее не меняется, т.е. фотоны придут к нам с первоначальным доплеровским смещением независимо от расстояния. Если же пространство *расширяется*, но источник покоится относительно нас (не сопутствует расширению), то фотоны от него испускаются без доплеровского смещения. В пути длины волн этих фотонов возрастут из-за расширения пространства и фотоны придут к нам с красным смещением из-за *растяжения*. Это сугубо космологическое красное смещение растёт с расстоянием. Это - два независимых механизма космологического красного смещения: первый, эффект Доплера для удаляющихся, имеется уже вначале, а второй, растяжение длин волн для любых источников, возникает при распространении.

В расширяющемся пространстве скорости *сопутствующих* расширению объектов растут с расстоянием. Если ввести вблизи такого объекта источник, покоящийся в нашей системе покоя (не сопутствующий расширению), то фотоны от него придут без эффекта Доплера и только с растяжением длин волн. А фотоны же от удаляющегося от нас источника испускаются с доплеровским красным смещением вначале, а затем в пути приобретают дополнительное красное смещение из-за растяжения их длин волн. При малых скоростях вклад обоих видов красного смещения одинаков, что и было причиной путаницы в трактовке природы смещения. Если скорости не малы, то эффект Доплера учитывается в релятивистской форме и возникают различия.

Итак, космологическое красное смещение сопутствующих расширению объектов содержит вклад обоих механизмов, а не одного из этих эффектов, как это предполагалось в фридмановских моделях. Тогда при предположении, что длина волны вначале совпадала с длиной волны фотонов здесь у нас, наблюдаемые смещения соответствуют вкладу лишь одного из этих механизмов. Итак, теория предсказывает два равноценных вида красных смещений, а интерпретация наблюдений с указанным предположением показывает наличие только одного из них. Это - *парадокс двойного красного смещения*.

В статьях [10] было показано, что согласие теории с наблюдениями достигается не игнорированием одного из этих двух независимых физических явлений, что ошибочно и вело к противоречиям в теории, а учётом третьего, допустимого в ГТО механизма, компенсирующего вклад одного из двух видов красного смещения.

Из космологического принципа следует, что длина волны фотона при испускании на удалении в раннюю эпоху совпадает с длиной волны такого же фотона у нас только в ту же самую раннюю эпоху (без учёта эффекта Доплера). Длины волн в разных местах в *разные эпохи*, космологический принцип не ограничивает. В ГТО есть свобода в выборе темпа собственных времён в разные космологические эпохи и выбор должен быть только на основе данных наблюдений. Если считать, что кроме двух механизмов космологического смещения, эффекта Доплера и растяжения, есть ещё и третий механизм - фиолетовое смещение для фотонов, испущенных в более ранние эпохи из-за более быстрого темпа времени, то этот новый вид смещения компенсируется в пути

красным смещением из-за растяжения длин волн и наблюдается лишь красное смещение из-за эффекта Доплера.

Итак, для решения парадокса двойного красного смещения темп собственного времени в прежние эпохи должен был быть более быстрым, чем сейчас. Выбирая темп нашего времени как эталон (так как сигналы от прежних эпох сравниваем с сигналами в наше время) приходим к модели *космологии с замедляющимся временем* (КЗВ), где нет парадокса двойного красного смещения.

Аберрация, изменение направления на источник света и его видимой светимости из-за относительной скорости наблюдателя, является одним из основных оптических эффектов в астрономии, учётом которого исключаются оптические искажения. В релятивистской кинематике эффект Доплера и аберрация сигналов от удаляющихся источников определяются одними и теми же факторами, т.е. наличие эффекта Доплера ведёт и к аберрации. Эти два эффекта влияют на свойства потока фотонов вместе – первый уменьшает частоту фотонов, а второй – число фотонов внутри данного телесного угла. При увеличении телесного угла конуса с тем же числом фотонов видимая светимость уменьшается. Это уменьшение плотности светового потока, приходящего от удаляющихся объектов, должно учитываться и в расширяющейся вселенной и из-за аберрации (возникающей, как и эффект Доплера, в момент испускания) удаляющиеся источники станут более тусклыми, чем покоившиеся источники на том же расстоянии.

Наблюдения уже в линейной части зависимости красных смещений от расстояния отвергают модели с метрикой Фридмана, ведущие к двойному красному смещению и согласуются лишь с КЗВ с одинарным конечным смещением. Как было показано в [10], новое соотношение «модуль расстояния-красное смещение» согласуется с данными наблюдений и описывает их без тёмной энергии или других умозрительных гипотез.

В КЗВ космологическая константа, а значит и тёмная энергия, отсутствуют, а уравнения Эйнштейна с плотностью энергии материи достаточны для описания наблюдений. Этим достигается согласие между космологией и физикой частиц в проблеме энергии вакуума. КЗВ приводит также к ряду новых следствий для ранней вселенной и позволяет решить известные космологические проблемы.

Бесконечность пространства в ньютоновской космологии приводила к ряду проблем, которые были практически неразрешимы. В релятивистской космологии тоже есть модели «открытой» вселенной бесконечного объёма (с плоским и гиперболическим пространствами), в которых возникают такие же проблемы. Вначале возможность «закрытой» вселенной конечного объёма в виде трёхмерной сферы казалась одной из главных достоинств релятивистской космологии. Тем более, как выяснилось позже, объяснить Большой Взрыв в пространстве конечного объёма естественнее, чем в бесконечном пространстве. Однако, в фридмановских моделях не удавалось согласовать параметры закрытой модели с наблюдательными данными и такие модели оказались практически вне поля зрения исследователей. Но в КЗВ кривизна пространства в нашу эпоху не играет такую решающую роль, как в фридмановских моделях. При этом модель закрытой вселенной оказалась вполне допустимой при тех параметрах, которые описывают наблюдательные данные. Поэтому возможность в ГТО реанимации моделей вселенной конечного объёма может стать одним из наиболее радикальных изменений в физической картине мира.

Заключение

Итак, как локальные, так и глобальные релятивистские эффекты универсальны и поэтому описываются отдельными теориями – ЛТО и ГТО. В терминах физических координат локальные части СТО и ОТО, ограниченные ЛСО, связанными локально-лоренцевыми преобразованиями, образуют ЛТО, а глобальные их части, также в протяжённых ГСО, построенных из одновременно сосуществующих ЛСО, образуют ГТО. Тем самым, ЛТО и ГТО оказались универсальными теориями, каждая из которых

единым образом описывает физические явления как в плоском, так и в искривлённом пространстве-времени.

Это дало возможность сугубо физического описания явлений квантовой и гравитационной физики, пользуясь методами этих двух теорий, что и сняло ряд проблем в этих областях физики, которые в рамках ОТО долго не имели однозначного решения.

История эволюции релятивистских представлений и различные применения ЛТО и ГТО более детально будут изложены в книге [4].

Литература

1. Einstein A. (1905) *Ann. d. Phys.*, **17**, 891; Эйнштейн А. (1965) *Собр. науч. тр.* т.1, с. 7.
2. Einstein A. (1916) *Ann. d. Phys.*, **49**, 769; Эйнштейн А. (1965) *Собр. науч. тр.* т.1, с. 452.
3. Закир З. (2020) *Квант. и грав. физ.*, **1:009-7260**.
4. Закир З. (2021) *Локальная и глобальная теории относительности*. ЦТФА, Т.
5. Родичев В.И. (1974) *Теория тяготения в ортогональном репере*. М.
6. Rosen N. (1940) *Phys. Rev.* **57**, 147, 150.
7. Закир З. (2020) *Квант. и грав. физ.*, **1:001-7128; 1:002-7128**.
8. Zakir, Z. (2018) *Astroph.& Sp. Sci.* **363**: 30.
9. Закир З. (2020) *Квант. и грав. физ.*, **1:006-7132; 1:007-7133**.
10. Закир З. (2020) *Квант. и грав. физ.*, **1:005-7130; 1:008-7160**.