

Специальная теория относительности как эмерджентная структура в евклидовой модели без времени

А. Н. Смирнов

2025

Аннотация

Рассматривается модель, в которой наблюдаемая структура пространства–времени возникает как эмерджентное явление из вещественного скалярного поля, удовлетворяющего уравнению Лапласа в четырёхмерном евклидовом пространстве без времени и выделенных направлений. Используя операциональное определение наблюдателя и событий, показано, что структура инерциальных систем отсчёта, преобразования Лоренца и элементы динамики могут быть реконструированы без постулирования минковской метрики. Получены элементы общей теории относительности, включая эмерджентную кривизну фолиации и вывод (а не постулирование) слабого и сильного принципов эквивалентности. Результаты демонстрируют, что модели без фундаментального времени и метрики согласуются с наблюдаемыми структурами пространства–времени и допускают строгое операциональное восстановление динамики и геометрии.

1 Введение

1.1 Проблема времени и причинности

В современной фундаментальной физике остаются открытыми три взаимосвязанных вопроса: (1) возможно ли формулирование физической теории при полном *отсутствии времени*; (2) как в этом контексте могут быть определены причинность и измерение; (3) и какова природа наблюдаемой псевдоримановой сигнатуры пространства–времени $(-, +, +, +)$,

возникающей при, казалось бы, более естественной евклидовой симметрии. Эти вопросы приобретают особую актуальность в контексте поиска единой теории, объединяющей квантовую теорию и гравитацию, поскольку многие аргументы [1] указывают на то, что в такой теории время должно быть не фундаментальным, а эмерджентным понятием. Близким к этим вопросам является вопрос о природе наблюдателя. В стандартной формулировке наблюдатель трактуется как абстрактный внешний агент, не влияющий на вопрос о том, что существует, измеряющий то, что объективно существует и без присутствия наблюдателя.

Многие подходы (causal sets [2, 3], loop quantum gravity [4], relational frameworks [5] и др.) предполагают отказ от явного времени на уровне уравнений, но сохраняют его в скрытом виде - через частичный порядок, параметр эволюции, логическую структуру «истории» или функциональные зависимости между состояниями. Даже в евклидовых формализмах, таких как путь интеграла, Wick-ротация предполагает возвращение к времени как физической координате.

В отличие от этого, настоящая модель формулируется в четырёхмерном евклидовом пространстве \mathbb{E}^4 , и в ней отсутствует не только координатное время, но и какая-либо фундаментальная структура, определяющая порядок, развитие или направление. Поле $\Phi(x)$, которое в модели является единственным и детально рассматривается в следующих разделах, подчиняется уравнению Лапласа и задаётся в виде единственной статической конфигурации. Все структуры, традиционно ассоциируемые со временем и причинностью в стандартных теориях, в этой модели не задаётся априорно, а определяется взаимодействием наблюдателя с полем. Наблюдатель в этой модели рассматривается не как абстрактное внешнее устройство, а как физически реализуемая структура внутри самой модели (см. раздел 3)

При этом в стандартной квантовой теории поля причинность вводится постулировано, в терминах световых конусов и гиперповерхностей постоянного времени. Эта структура требует априорного выделения времени и метрики Минковского и теряет обоснование, если время не является фундаментальной величиной, а возникает как операциональное следствие. В задачах, связанных с гравитацией, реконструкцией пространства-времени и безвременными формулировками квантовой теории, подобные постулаты теряют применимость и не могут быть универсально обоснованы.

Наконец, метрика Минковского в специальной и общей теории относительности всегда задаётся постулировано. Однако теорема о сигнатурах [6, 7] запрещает глобальное преобразование положительно-определённой формы в псевдориманову, что означает: если лоренцева структура воз-

никает, она должна быть эффективной и локальной. Это особенно важно в моделях, где пространство–время и динамика являются эмерджентными.

Множество существующих подходов также стремятся устранить время из фундаментальной теории. В частности, в *causal set theory* время сохраняется в виде частичного порядка на событиях, что по сути задаёт ориентированную причинную структуру. В *loop quantum gravity* и спиновых пенёчках эволюция реализуется через переходы между граничными состояниями, а временная ось вводится как параметр внешней интерпретации. В *Page–Wootters mechanism* [8] и *relational quantum mechanics* [5] время определяется через квантовую корреляцию между подсистемами, однако предполагается существование уже постулированного гильбертова пространства состояний и измерительного акта.

В *timeless* подходах, таких как модель Барбура [9], предполагается отказ от параметра времени, но сохраняется конфигурационное пространство или пространственно-временные связи, допускающие восстановление динамики. В *QBism* [10] и *observer-centric QFT* [11] субъект вводится как внешне-интерпретирующая структура, но не как физически реализованное тело в рамках той же теории. Во всех этих случаях, так или иначе, либо сохраняется скрытая форма времени, либо наблюдатель трактуется внешне, см. также сравнение интерпретаций в [12].

Предлагаемая модель радикально отличается: она устраняет не только координатное время, но и любую форму внутреннего порядка или параметра эволюции, при этом моделируя наблюдателя как локализованную конфигурацию самого поля. Все причинные связи, динамика и события возникают *операционально* - из взаимодействия с полем на выбранной фолляции, а не постулируются изначально.

Под операциональностью в данной работе понимается определение физических структур на основе наблюдаемых взаимодействий локализованного наблюдателя с конфигурацией поля, без обращения к внешнему времени, координатной динамике или априорной метрике. Такая трактовка позволяет формализовать причинность, измерение и наблюдаемые преобразования (см. раздел 5) как внутренние операциональные структуры.

В этом смысле модель представляет собой строгую реализацию безвременного формализма с внутренним наблюдателем, из которой выводятся и специальная теория относительности (СТО), и основы общей теории относительности (ОТО). Моделирование наблюдателя как физической части конфигурации позволяет воспроизвести явления, недостижимые в подходах с внешним наблюдателем - от реконструкции причинности до возникновения СТО и ОТО.

1.2 Евклидовы модели и роль наблюдателя

Евклидовы методы зарекомендовали себя как технически мощные средства (например, в статистической физике и в квантовой теории поля с траекторным интегралом), но во всех известных случаях они рассматриваются как вспомогательные - с необходимым возвращением к времени после Wick-ротации. Попытки построить полноценные эвклидовы модели с физическим смыслом сталкиваются с трудностями: отсутствует механизм появления причинности, неясна структура событий и её связь с наблюдением, не выведены лоренцевы преобразования и предельная скорость.

Кроме того, в этих подходах наблюдатель либо отсутствует, либо вводится постфактум как внешний агент. В данной работе исследуется возможность описания наблюдателя как физической конфигурации, возникающей в рамках той же модели: через локализованное разложение поля (см. раздел 3). Такой наблюдатель взаимодействует с $\Phi(x)$ и, благодаря выбору фолиации, определяет те величины, которые приобретают физическое значение - в том числе структуру событий, последовательность, динамику и причинную связность.

Такой подход позволяет трактовать как причинность, так и измерение не как внешние постулаты, а как операциональные структуры, возникающие внутри модели и зависящие от наблюдателя. При этом сама модель остаётся формально эвклидовой, без введения времени или предзаданной динамики.

1.3 Цель и содержание работы

Основная цель данной работы - ввести в дискурс теоретической физики модели без времени. Мы выбрали модель с четырёхмерным евклидовым пространством, на котором определено вещественное поле без выделенных направлений и внутренних симметрий. Мы рассматриваем её как минимально достаточную для демонстрации ключевых свойств моделей без времени и для показа того, что такие модели могут быть согласованы с наблюдаемыми аспектами известной физики. Целью данной работы не является построение полной физической теории, она ограничена рассмотрением ключевых структурных последствий модели.

Для реализации этой цели в данной работе будет показано, что в строго эвклидовой модели с уравнением Лапласа можно:

- формализовать причинность как локальную операциональную структуру, независимую в каждой инерциальной системе отсчета (ИСО);

- вывести оба постулата специальной теории относительности;
- вывести преобразования Лоренца;
- показать, что модель может быть расширена для включения общей теории относительности.

Конструкция основана на скалярном поле $\Phi(x)$ в \mathbb{E}^4 , подчинённом уравнению:

$$\Delta_{\mathbb{E}^4}\Phi(x) = 0.$$

Поле $\Phi(x)$ в данной работе рассматривается не как объект, для которого ищется явное решение уравнения Лапласа, а как обобщённая конфигурация, удовлетворяющая этому уравнению в слабом (функциональном) смысле. Анализ не сосредоточен на решении уравнения как такового, а направлен на установление физических следствий, возникающих при наложении ограничений на допустимые решения - в частности, вывод преобразований специальной теории относительности и операциональных структур, возникающих при взаимодействии с локализованным наблюдателем.

Поле не содержит фундаментальной динамики, временных параметров или внутренних симметрий. Его взаимодействие с локализованным наблюдателем, определённым через фолиацию и разложение по базису, позволяет операционально построить события, эволюцию и структуру ИСО.

Основные результаты работы:

- Показано, что при операциональном определении событий и переходах между ИСО автоматически возникают:
 - причинность как локальная операциональная структура, независимая в каждой ИСО;
 - два постулата специальной теории относительности;
 - наблюдаемые преобразования, с лоренцевой структурой;
 - инвариантная предельная скорость v_{max} как максимальная скорость распространения причинного влияния внутри любой инерциальной системы отсчёта.
- Введено строгое различие между:
 - *прямыми преобразованиями*, описывающими сопоставление событий в разных ИСО как если бы существовало глобальное пространство событий;

- *наблюдаемыми преобразованиями*, определяющими, как события и связи выглядят для наблюдателя, находящегося в конкретной ИСО.
- Установлено, что СТО - это структура наблюдаемых преобразований, возникающая как иллюзия согласованности событий во всех ИСО при отсутствии глобального пространства событий.
- Показано, что принцип причинности в модели модифицируется: он применяется независимо внутри каждой ИСО и не опирается на существование глобального пространства событий. При этом различие между причинными структурами разных ИСО стремится к нулю при стремлении их относительных скоростей к нулю.
- Намечено соответствие между операциональной структурой модели и принципами общей теории относительности, требующее дальнейшего развития.

Работа организована следующим образом. Разделы 2–3 описывают фундаментальную постановку модели и определение наблюдателя. В разделе 4 строятся ИСО и вводится понятие относительной скорости. Раздел 5 содержит анализ возникающих типов преобразований при смене ИСО и кинематический вывод постулатов СТО. Раздел 6 содержит вывод преобразований Лоренца как преобразований, соответствующих одному из типов преобразований при смене ИСО. В разделе 7 обсуждаются память наблюдателя. В разделе 8 строится эскиз динамики. Анализируется возможность получения в модели элементов общей теории относительности. Раздел 9 посвящён ограничениям модели. Раздел 10 содержит выводы и перспективы дальнейших исследований.

2 Фундаментальная постановка

2.1 Евклидово пространство \mathbb{E}^4

Рассматривается четырёхмерное вещественное евклидово пространство \mathbb{E}^4 , наделённое стандартной метрикой δ_{AB} сигнатуры $(+, +, +, +)$, где латинские индексы $A, B = 1, \dots, 4$. Пространство не содержит выделенных направлений, координат, временных осей или причинной структуры.

Геометрия \mathbb{E}^4 инвариантна относительно группы ортогональных преобразований $O(4)$. Любая гиперплоскость, заданная уравнением $n_A x^A = s$, где n_A - единичный нормальный вектор, играет равноправную роль.

Ни одна фолиация пространства не является априори физически привилегированной.

2.2 Базовое поле модели и уравнение Лапласа

На \mathbb{E}^4 задано вещественное скалярное поле $\Phi(x)$, удовлетворяющее уравнению

$$\Delta_{\mathbb{E}^4}\Phi(x) = 0, \quad (1)$$

где $\Delta_{\mathbb{E}^4} = \delta^{AB}\partial_A\partial_B$ - лапласиан евклидова пространства.

Это уравнение рассматривается как *единственное уравнение модели*. Оно не содержит выделенного времени, не задаёт внутренней динамики, не содержит внутренних симметрий и выделенных направлений, и не содержит взаимодействий - ни линейных, ни нелинейных. Решение $\Phi(x)$ предполагается фиксированным однозначно, включая граничные условия. Это отражает тот факт, что в безвременной модели невозможно задать независимые начальные условия: всё содержание модели задаётся единственной конфигурацией поля, без апелляции к эволюции.

2.3 Отсутствие времени и причинной структуры

Никаких дополнительных структур, определяющих направление эволюции, порядок событий или динамические переменные, не вводится. Вся конструкция предполагает полное отсутствие времени - как координатного, так и функционального. Поле $\Phi(x)$ трактуется как *статическая конфигурация* на \mathbb{E}^4 , а не как результат эволюции.

Это означает, что ни поле, ни пространство не содержат в явной форме причинных связей. Единственным источником наблюдаемых причинностей выступает наблюдатель, локализованный в пространстве и взаимодействующий с полем через операциональную схему, описанную далее.

2.4 Цель построения

Целью данного раздела является описание сцены, на которой будет разворачиваться вся наблюдаемая физика. Никакие физические величины, события, симметрии или уравнения движения не закладываются в модель изначально. Всё, что может быть интерпретировано как пространство-время, материя или динамика, должно возникать как результат операционального взаимодействия наблюдателя - то есть функционально выделенной локальной структуры внутри поля $\Phi(x)$ - с его глобальной конфигурацией.

3 Наблюдатель и операциональное определение событий

3.1 Локализация наблюдателя

В модели наблюдатель не рассматривается как внешний агент, а описывается средствами той же конструкции, что и всё остальное: как локализованная структура в пространстве \mathbb{E}^4 , выделяемая внутри поля $\Phi(x)$. Для этого фиксируется гиперплоскость

$$\Sigma_s^3 = \{x \in \mathbb{E}^4 \mid n_A x^A = s\}, \quad s \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

где n_A - фиксированный единичный вектор, определяющий фолиацию пространства. Также выбирается локальная область $\Omega \subset \Sigma_s^3$, компактная по трём направлениям.

В этой области производится ортонормированное разложение поля $\Phi(x)$ по некоторому базису $\{u_\alpha(x)\}$, построенному на гиперплоскости. Конкретный выбор базиса и области Ω определяет конкретного наблюдателя:

$$\Phi(x) \Big|_\Omega = \sum_\alpha a_\alpha u_\alpha(x) \quad (3)$$

Величины a_α трактуются как внутренние переменные наблюдателя - их совокупность представляет *тело наблюдателя*.

3.2 Фолиация и направление переноса

Фолиация евклидова пространства \mathbb{E}^4 , определяемая в (2), разбивает пространство на семейство трёхмерных гиперплоскостей Σ_s^3 , ортогональных выбранному вектору n_A и параметризованных вещественным скаляром s , который трактуется как *операциональное время* в системе отсчёта наблюдателя. Каждая гиперплоскость интерпретируется как момент времени в соответствующей инерциальной системе отсчёта (ИСО). Позже мы покажем, что разные ориентации гиперплоскостей, с выбранным направлением времени, соответствуют разным ИСО.

Фиксированная ориентация n_A определяет направление «переноса» между срезами, а выбор фолиации - структуру локального темпорального упорядочивания. Таким образом, направление времени в модели не задано заранее, а определяется наблюдателем операционально, через выбор ориентации гиперплоскостей, используемых в реконструкции.

Требование причинной реконструкции. Каждая операциональная инерциальная система отсчёта (ИСО) связана с определённым выбором фолиации Σ^3 и направлением времени \mathbf{n} . Для того чтобы реконструкция событий в данной ИСО была согласована с принципом причинности, она должна удовлетворять следующим условиям:

- (i) модовое разложение поля $\Phi(x)$ по данной фолиации должно быть построено так, чтобы отдельные моды u_a были локализованы в пределах гиперплоскости Σ^3 и допускали локальное распространение вдоль направления \mathbf{n} с конечной эффективной скоростью $v \leq v_{\max}$ ¹, определяемой в операциональной реконструкции событийности;
- (ii) уравнение, которому подчиняется поле $\Phi(x)$, должно допускать такие локальные моды и сохранять их эволюционную согласованность вдоль любого допустимого направления \mathbf{n} , согласующегося с евклидовой структурой;
- (iii) переход между близкими ИСО (то есть малыми поворотами фолиации) не должен разрушать согласованную событийную структуру: симметрическая разность между реконструируемыми множествами событий $\mathcal{C}_n \Delta \mathcal{C}_{n'}$, то есть множество событий, присутствующих только в одном из реконструированных наборов, должна стремиться к нулю при $\theta \rightarrow 0$.

Эти условия являются операциональными: они не постулируются извне, а вытекают из необходимости воспроизводимости событийной структуры и согласованности между различными фолиациями. Таким образом, причинность в модели не задана априорно, а возникает как условие на допустимость реконструкции и согласие наблюдателя с ограничением на скорость передачи взаимодействий.

Допустимость разложений и конфигураций. Важно подчеркнуть, что не каждое решение уравнения (1) допускает причинную реконструкцию. Модель накладывает дополнительное ограничение: рассматриваются только такие решения, которые допускают разложение по фолиации Σ^3 в локальные моды $\{u_a\}$, удовлетворяющие условиям причинной согласованности. Эти решения образуют физически допустимое подмножество $\mathcal{S} \subset \ker \Delta$, в котором:

- (a) моды u_a локализованы в пределах области гиперплоскости Σ^3 ;

¹Под v_{\max} понимается предельная скорость взаимодействия в реконструируемом пространстве-времени, определяемая в разделе 6.

- (b) взаимодействия между модами поля и модами тела наблюдателя допускают событийную интерпретацию;
- (c) при малом повороте направления \mathbf{n} сохраняется согласованная реконструкция событийности.

Это означает, что допустимость конфигурации поля определяется не только выполнением уравнения, но и операциональной реализуемостью модового разложения с причинной структурой. В частности, если для некоторой конфигурации $\Phi(x)$ не существует фолиации с согласованным модовым разложением, такая конфигурация исключается из физического описания.

Инвариантность оператора переноса. Для любого направления фолиации n_A введём коэффициенты

$$a_\alpha^{(n)}(s) = \int_{\Sigma_s^{(n)}} u_\alpha^{(n)}(x) \Phi(x) d^3x, \quad \alpha \in \Lambda_O, \quad (4)$$

где $\{u_\alpha^{(n)}\}$ - ортонормированный базис мод на гиперплоскости $\Sigma_s^{(n)}$: $n_A x^A = s$. Операциональная реконструкция внутри данной ИСО постулирует линейный перенос

$$a_\alpha^{(n)}(s + ds) = \sum_{\beta \in \Lambda_O} A_{\alpha\beta}[\Phi] a_\beta^{(n)}(s), \quad (5)$$

где $A_{\alpha\beta}[\Phi]$ может зависеть только от *локальных* значений конфигурации Φ .

Поскольку исходное поле удовлетворяет линейному уравнению $\Delta_{\mathbb{E}^4} \Phi = 0$ и инвариантно под полным ортогональным групповым действием $O(4)$, формула (5) обязана сохранять свою функциональную форму при любом повороте гиперплоскости $\Sigma_s^{(n)} \mapsto \Sigma_s^{(n')}$:

$$A_{\alpha\beta}[\Phi] = A'_{\alpha\beta}[\Phi] \quad \forall n_A, n'_A. \quad (6)$$

То есть оператор переноса $A[\Phi]$ *универсален* для всех ИСО. Именно эта универсальность и выражает одинаковость операциональных «законов физики» для всех наблюдателей независимо от ориентации фолиации.

Эмерджентность причинности. Таким образом, принцип причинности в каждой ИСО реализуется не как фундаментальный постулат, а как условие операциональной согласованности: наблюдатель способен

реконструировать причинную структуру только если существует соответствующее разложение поля. Это особенно важно в контексте евклидовой симметрии пространства: несмотря на отсутствие выделенного времени на фундаментальном уровне, темпоральное направление и причинность эмерджируют как операциональные структуры, определяемые выбором фолиации и допустимостью реконструкции.

3.3 Определение события

При формулировке понятия *события* необходимо решить две задачи.

(i) **Операциональное происхождение.** Событие должно возникать как результат взаимодействия наблюдателя с полем, а не как заранее заданная онтологическая сущность. В предлагаемом контексте событие - это такая конфигурация взаимодействия между модами базового поля и модами наблюдателя, которая вызывает дискретное обновление состояния последнего в его собственном внутреннем пространстве состояний; это обновление регистрируется самим наблюдателем и попадает в его «операциональную историю».

(ii) **Согласованность между описаниями разного масштаба.** Поскольку физический наблюдатель имеет конечную протяжённость и ограниченный спектральный диапазон, его взаимодействие с полем ограничено проекцией на конечномерное подпространство. Определение события должно оставаться непротиворечивым при переходе к более грубым или, наоборот, более тонким модовым разложениям, то есть не зависеть от конкретного выбора рабочей «точности» наблюдателя.

Как будет показано в последующих разделах, операциональная модель допускает согласованную реконструкцию событийности при переходе между инерциальными системами отсчёта (ИСО), определяемыми различными направлениями фолиации. Хотя события определяются только относительно одного наблюдателя и в его системе отсчёта, согласие между различными ИСО обеспечивается через совместимость реконструкций. При этом преобразования между описаниями событийной структуры оказываются формально эквивалентны преобразованиям Лоренца.

Ниже приводится определение события, соответствующий обоим задачам.

Пусть наблюдатель O фиксирует ориентацию гиперплоскостей Σ_s и ограниченное подпространство $\mathcal{H}_{\text{field}}^{(O)} = \text{span}\{u_\alpha\} \subset L^2(\Sigma_s)$, а также набор собственных мод $\{\chi_\beta\}$ своего «тела». Взаимодействие описывается

детекторным функционалом

$$\mathcal{E}_O(s) = \sum_{\alpha, \beta} \rho_{\alpha\beta}^{(O)} a_\alpha(s) b_\beta(s), \quad (7)$$

где $a_\alpha(s)$ и $b_\beta(s)$ - коэффициенты разложения поля и наблюдателя на срезе Σ_s , а $\rho^{(O)}$ - фиксированная симметричная (в вещественном случае) или эрмитова (в контексте комплексного расширения) матрица, задающая чувствительность наблюдателя к различным комбинациям взаимодействующих мод. Предполагается, что функции $a_\alpha(s), b_\beta(s)$ гладки по s .

Событием $E_O(s_0)$ называется значение s_0 , при котором

$$\mathcal{E}_O(s_0) \geq I_{\text{thr}}^{(O)}, \quad \partial_s \mathcal{E}_O|_{s_0} = 0, \quad \partial_s^2 \mathcal{E}_O|_{s_0} < 0, \quad (8)$$

где $I_{\text{thr}}^{(O)} > 0$ - порог чувствительности. После выполнения условий (8) внутренний «флаг» $P_O \subset \mathcal{H}_{\text{obs}}$ дискретно переключается $0 \rightarrow 1$, фиксируя событие в памяти наблюдателя.

Разложение (7) задаёт *первичный* уровень событийности, основанный на локальном совпадении мод поля и наблюдателя. Если впоследствии наблюдатель перейдёт к более грубому описанию (например, объединив близкие моды в эффективные комбинации), функционал \mathcal{E}_O можно переписать через новые коэффициенты, не меняя самого критерия (8). Таким образом, определение события не зависит от конкретного уровня детальности и остаётся операционально устойчивым.

Каждое событие фиксируется *внутри* одной ИСО; глобального пространства событий модель не предполагает. Причинность реализуется как упорядоченная дискретная история $\{E_O\}$, записанная наблюдателем в его собственной системе отсчёта.

4 Инерциальные системы отсчёта и относительная скорость

4.1 Фолиации как ИСО

В отсутствие времени и динамики каждое направление фолиации в \mathbb{E}^4 , заданное единичным вектором n_A , определяет локальную событийную структуру, возникающую в результате взаимодействия наблюдателя с полем. Такая структура полностью задаётся выбором гиперплоскостей $n_A x^A = s$, ортогональных n_A , и операциональной интерпретацией s как

эмерджентного операционального времени, возникающего из взаимодействия наблюдателя с полем.

В рамках данной модели под *инерциальной системой отсчёта* (ИСО) понимается направление фолляции n_A , относительно которого могут быть согласованно определены события, причинность и наблюдаемые величины через локализованное разложение поля и его взаимодействие с телом наблюдателя. Все ИСО в данной работе трактуются именно в этом, операциональном, смысле.

Ни одна из ИСО не является физически выделенной: модель инвариантна относительно полной группы ортогональных преобразований $O(4)$, и различие между ИСО возникает только как различие в выборе направления реконструкции. В дальнейшем будет показано, что переходы между направлениями фолляции порождают согласованные преобразования наблюдаемых величин, формально совпадающие с преобразованиями Лоренца.

Операциональный принцип инерции. Каждое тело в модели представлено как локализованная совокупность мод базового поля, определяемая на гиперплоскостях выбранной фолляции. Его *движение* в фиксированной ИСО описывается как последовательность событий, возникающих в результате взаимодействия тела с глобальной конфигурацией поля $\Phi(x)$.

Если последовательность событий вдоль параметра s изменяет свою геометрию в гиперплоскостях Σ_s^3 - например, наблюдается смещение или искривление траектории тела, - такое поведение интерпретируется как *ускорение*. Согласно операциональному подходу, ускорение требует наличия *причины*, то есть дополнительного взаимодействия тела с модами поля вне его локального разложения. Такое взаимодействие интерпретируется как *внешнее* по отношению к телу и приводит к отклонению событийной траектории от инерциальной.

Таким образом, если в ИСО тело сохраняет равномерное и прямолинейное движение (в терминах согласованной последовательности событий), это означает отсутствие внешнего воздействия и, следовательно, отсутствие причины для изменения его поведения. В этом смысле, причинность в модели реализуется через отклонения от инерциальности: каждое ускорение операционально связано с дополнительным взаимодействием.

Следовательно, при отсутствии внешнего воздействия событийная траектория тела остаётся прямолинейной и равномерной в выбранной ИСО. Это соответствует операциональной формулировке принципа инерции:

если на тело не действует причина, его реконструируемое поведение в данной ИСО остаётся неизменным. Таким образом, инерциальность трактуется как устойчивость событийной структуры тела при фиксированной конфигурации поля и заданном направлении фолиации.

4.2 Переход между ИСО и определение относительной скорости

Пусть заданы две инерциальные системы отсчёта (ИСО), соответствующие фолиациям вдоль направлений n_A и n'_A . Эти направления связаны ортогональным преобразованием евклидова пространства:

$$n'_A = R_A^B n_B, \quad R \in O(4). \quad (9)$$

Каждое направление фолиации n_A задаёт набор гиперплоскостей $n_A x^A = s$, интерпретируемых как «моменты времени» в данной ИСО. События определяются как локальные взаимодействия в пределах этих гиперплоскостей. Однако проекции одних и тех же точек $x \in \mathbb{E}^4$ на гиперплоскости двух разных фолиаций, например $n_A x^A = s$ и $n'_A x^A = s'$, различаются. Это приводит к операционально фиксируемому смещению событий при последовательном переносе вдоль направления n_A , если n'_A наклонён относительно n_A .

Такое расхождение в реконструкции событий интерпретируется как *относительная скорость* между ИСО. Пусть θ - угол между направлениями n_A и n'_A . Тогда при каждом шаге переноса вдоль n_A на единичное расстояние, наблюдатель регистрирует смещение гиперплоскости n'_A в поперечном направлении на величину, пропорциональную $\sin \theta$. Это смещение интерпретируется как наблюдаемая относительная скорость:

$$v = v_t \cdot \sin \theta, \quad (10)$$

где v_t - масштабный коэффициент, связывающий шаг переноса с единицей наблюдаемого времени (будет зафиксирован в разделе 6).

Таким образом, относительная скорость между ИСО определяется исключительно углом между их фолиациями. В пределе $\theta \rightarrow 0$ соответствующие пространства–времена становятся локально согласованными.

4.3 Следствие: множество пространств–времен

Поскольку фолиации n_A и n'_A приводят к различным разложениям поля и, следовательно, к различным наборам событий, каждое направление n_A задаёт своё собственное пространство–время. Между этими про-

странствами нет единого согласованного отображения на уровне событий. Модель не содержит глобального пространства событий: имеются лишь локальные проекции, специфичные для каждой ИСО.

Наблюдаемая скорость возникает как относительное расхождение событий между этими пространствами при перпендикулярных сдвигах гиперплоскостей. В пределе $\theta \rightarrow 0$ пространства–времени становятся локально согласованными, что будет использоваться при выводе наблюдаемых преобразований, формально эквивалентных преобразованиям Лоренца.

5 Наблюдаемые преобразования и постулаты СТО

5.1 Два типа преобразований

В отсутствие глобального пространства событий переход между различными инерциальными системами отсчёта (ИСО), соответствующими направлениям фолиации n_A и n'_A , может трактоваться двумя различными способами:

- **Прямые преобразования** - математическое сопоставление конфигураций поля и событий между различными фолиациями в \mathbb{E}^4 , как если бы существовало глобальное пространство событий. Они отображают различия в определении событий и причинных связей между ИСО, не ограничиваясь доступной информацией наблюдателя.
- **Наблюдаемые преобразования** - операциональная реконструкция событийной структуры наблюдателем при переходе от одной ИСО к другой. Поскольку наблюдатель не обладает доступом к полю вне текущей фолиации, реконструкция в новой ИСО осуществляется только на основе локализованной конфигурации мод, сохранённой в теле наблюдателя. Эта реконструкция производится так, чтобы обеспечить согласованное и непрерывное описание наблюдаемых взаимодействий в новой системе.

Наблюдаемые преобразования, в отличие от прямых, не являются объективным сопоставлением двух структур поля, а реализуют внутреннюю реконструкцию событийности, согласованную с предшествующим состоянием операциональной памяти. При этом возможны исчезновение

или появление событий, не нарушающее согласованности наблюдаемой истории.

Поскольку реконструкция основана только на операционально доступной информации, наблюдатель, переходящий к новой ИСО, оперирует *наблюдательно эквивалентной* событийной структурой. Это совпадение не означает физической тождественности событий, а лишь их согласованность с ограниченной доступной информацией. Таким образом, наблюдаемые преобразования реализуют непрерывный переход между описаниями, не требующий существования глобального пространства событий.

Различие между этими типами преобразований лежит в основе вывода наблюдаемой инвариантности законов физики и постулатов специальной теории относительности, как будет показано в следующем разделе.

5.2 Операциональная эквивалентность событий

Наблюдатель, переходя от одной ИСО к другой, не обладает информацией о событиях, не принадлежащих его текущей фолиации. При этом вся память, связанная с событиями, сохраняется в виде конфигурации мод поля, локализованной в теле наблюдателя. Операциональная реконструкция событийной структуры в новой ИСО осуществляется таким образом, чтобы быть согласованной с доступной частью этой памяти. В этом процессе часть ранее зафиксированных событий может стать операционально недоступной, а новые события - добавлены для обеспечения согласованности причинных связей в новой ИСО. Это приводит к совпадению наблюдаемых событий между ИСО, несмотря на возможные различия при прямом сопоставлении конфигураций поля.

Таким образом, несмотря на различие причинно-следственных связей и событий между ИСО, наблюдатель оперирует *операционально эквивалентными* событиями в различных ИСО. Это совпадение не отражает физической тождественности: при прямом сопоставлении разложений поля события могут различаться. Однако поскольку наблюдатель не имеет доступа к событиям вне своей фолиации и оперирует только сохранённой операциональной памятью, реконструкция в новой ИСО осуществляется так, как если бы структура событий сохранялась. Глобальное пространство событий при этом не формируется.

5.3 Инвариантность операционального закона взаимодействия

Уравнение Лапласа инвариантно относительно вращений группы $O(4)$. Это означает, что правило эволюции коэффициентов разложения поля при перпендикулярном переносе (5) одинаково для всех направлений фолиации. Таким образом, все наблюдатели, независимо от выбранного направления n_A , используют одну и ту же операциональную схему реконструкции последовательности событий.

Это соответствует *первому постулату специальной теории относительности* в операциональной формулировке:

Операциональная структура физических взаимодействий одинакова во всех инерциальных системах отсчёта.

5.4 Ограничение на предельную скорость

В рамках данной модели причинность определяется как операционально согласованная реконструкция событий в пределах одной инерциальной системы отсчёта (ИСО). Из самого операционального определения причинности естественным образом вытекает ограничение на максимальную скорость, с которой может распространяться наблюдаемое причинное влияние, не нарушая согласованности реконструкции.

Если такая максимальная скорость v_{\max} существует, то из симметрии $O(4)$ скалярного поля следует, что её значение одинаково во всех ИСО. При этом важно подчеркнуть, что v_{\max} ограничивает скорость причинных связей внутри одной ИСО; она не ограничивает относительные скорости между различными ИСО, поскольку такие скорости не имеют операциональное значение для одного наблюдателя.

Так, например, при перпендикулярной ориентации фолиаций двух ИСО их относительная скорость в реконструируемом пространстве-времени будет формально бесконечной. Это допустимо в модели, поскольку причинность определяется локально, внутри каждой ИСО, и не требует глобальной согласованности между всеми фолиациями.

Максимальная скорость v_{\max} определяется структурой мод наблюдателя и ограничениями на согласованную проекцию конфигурации поля на выбранную фолиацию. Она носит строго операциональный характер: наблюдатель не может интерпретировать два события как причинно связанные, если их реконструкция требует превышения v_{\max} в его собственной координатной структуре.

В следующем разделе v_{\max} будет сопоставлена с масштабным параметром временной нормировки, который определяется согласованностью

реконструкций при малых переходах между ИСО. Поскольку согласованность возможна только при конечном значении этого параметра, отсюда следует, что и v_{\max} должна быть конечной.

Таким образом, v_{\max} представляет собой внутренний предел операциональной причинности в данной ИСО. Он не зависит от выбора координат, процедур регистрации или других наблюдателей, и его существование соответствует *второму постулату специальной теории относительности* в следующей форме:

Существует конечная предельная скорость v_{\max} , одинаковая для всех наблюдателей внутри их собственных инерциальных систем отсчёта, определяющая максимальную скорость, с которой может распространяться причинное взаимодействие, не нарушая согласованности операциональной реконструкции событий.

5.5 Наблюдаемые преобразования с лоренцоподобной структурой

Требование сохранения событийной структуры при переходе между ИСО означает, что наблюдаемые преобразования должны сохранять операционально воспроизводимую структуру событийной причинности. Геометрически это выражается в сохранении формы, аналогичной инвариантности квадратичной величины

$$s^2 - v^2 r^2 = \text{const}, \quad (11)$$

где s - параметр переноса вдоль направления фолиации (временной координаты в реконструкции), r - евклидова норма координаты в гиперплоскости Σ^3 , а v - относительная скорость между ИСО в реконструируемом описании. Эти преобразования сохраняют операциональную событийность и реализуют согласованные наблюдаемые описания.

Формула (11) в данном разделе используется как эвристическое выражение сохранения событийной структуры; её строгий вывод из операциональных требований будет дан в следующем разделе.

Таким образом, структура специальной теории относительности возникает как результат операционально допустимых преобразований между ИСО, обеспечивающих согласованную реконструкцию событийности при отсутствии глобального пространства событий. Этот вывод не требует метрики Минковского пространства или постулирования фундаментальной временной координаты и основан исключительно на операциональной согласованности наблюдений внутри локальной фолиации.

6 Вывод преобразований Лоренца из операциональной структуры

6.1 Ограничения на класс реконструкций

В этом разделе рассматриваются только те случаи операциональной реконструкции, при которых:

- направление операционального времени наблюдателя задаётся единичным вектором $\mathbf{n} \subset \mathbb{R}^4$;
- операциональное пространство согласуется с гиперплоскостью $\Sigma^3 \perp \mathbf{n}$;
- реконструируемая длина между событиями в Σ^3 равна евклидовому расстоянию $\lambda = \ell$.

Это частный, но физически значимый случай, позволяющий строго вывести преобразования Лоренца на основе геометрии и операциональных ограничений. Более общая постановка, включающая вариации кривизны и нелинейности, приводит к элементам общей теории относительности и рассматривается отдельно.

Замечание об ограничении причинных связей. В рамках модели реконструкция событий должна сохранять причинную согласованность. Это требует, чтобы два пространственно разделённых события на расстоянии λ могли быть интерпретированы как причинно связанные, только если между ними проходит не менее времени $t = \lambda/v_{\max}$, где v_{\max} - некоторая конечная предельная скорость взаимодействия. Это ограничение не вводится постулировано, а возникает как следствие требования операциональной согласованности при реконструкции событий наблюдателем.

Инвариантность величины v_{\max} во всех допустимых реконструкциях является следствием полной $O(4)$ -симметрии уравнения Лапласа: поскольку все направления в \mathbb{E}^4 физически эквивалентны, предельная скорость взаимодействий, определяемая внутри фолиации, не может зависеть от ориентации гиперплоскости.

Это фундаментальное свойство дополняется операциональным требованием: при переходе между двумя ИСО различие в причинной структуре должно стремиться к нулю, при стремлении относительной скорости двух ИСО к нулю. Совокупность этих условий гарантирует, что реконструируемая событийность остаётся согласованной при малых переходах фолиации, без появления новых или исчезновения старых событий.

6.2 Операциональный вывод преобразований Лоренца

Пусть наблюдатель \mathcal{O} осуществляет операциональную реконструкцию событий на основе гиперплоскости Σ^3 и нормали \mathbf{n} . Он определяет временной параметр как:

$$t = \frac{\ell}{v_t} \quad (12)$$

где ℓ - расстояние вдоль \mathbf{n} , а v_t - масштабный параметр сопоставления расстояния и времени в данной реконструкции.

Для согласования событийной структуры при переходе к новой ИСО (другой фолиации \mathbf{n}'), наблюдатель требует, чтобы реконструкция обеспечивала непрерывность и операциональную согласованность наблюдаемой событийности. В этом контексте естественно принять линейность преобразований между координатами: хотя это условие не выводится напрямую из фундаментального уравнения модели, оно является необходимым условием обратимости и локальной непротиворечивости реконструкции в пределе малых поворотов фолиации ($v \rightarrow 0$), анализируемом в следующем подразделе. Таким образом, реконструкция должна удовлетворять следующим условиям:

- преобразования являются линейными, что обеспечивает согласованное сопоставление событий при малых переходах между фолиациями;
- сохранялась инвариантная предельная скорость v_{\max} , определяющая максимальную скорость распространения причинных связей между событиями в пределах одной ИСО.

Из этих условий однозначно следуют преобразования Лоренца с параметром v_{\max} :

$$t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{v_{\max}^2} \right), \quad (13)$$

$$x' = \gamma(x - vt), \quad (14)$$

где $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/v_{\max}^2}$.

Геометрическая интерпретация. Изменение ИСО соответствует повороту гиперплоскости Σ^3 на угол θ в \mathbb{R}^4 , с:

$$\tan \theta = \frac{v}{v_t} \quad (15)$$

Максимально допустимое значение $\theta = \pi/2$ соответствует ситуации, при которой перпендикуляр к одной фолиации становится параллелен другой, и реконструкция становится невозможной. Однако важно понимать, что это ограничение не определяет величину v_{\max} : угол между фолиациями - это геометрическая характеристика прямых преобразований, тогда как v_{\max} - это ограничение на скорость взаимодействий внутри одной фолиации.

Таким образом, предельная наблюдаемая скорость взаимодействия v_{\max} не определяется через геометрию поворота между фолиациями, а требует отдельного операционального анализа, приведённого в следующем подразделе.

6.3 Нормировка времени и вывод предельной скорости

Используем ранее введённую нормировку временной координаты через масштабный параметр v_t , уравнение (12).

Сама по себе эта нормировка ещё не определяет величину v_t . Однако из требования согласованности реконструкции между близкими ИСО, связанными малыми поворотами фолиации, следует строгое ограничение на допустимые значения v_t .

Предел малых скоростей. Рассмотрим две фолиации, заданные направлениями \mathbf{n} и \mathbf{n}' , отклонёнными друг от друга на малый угол θ . В модели это отклонение в первом приближении имеет вид:

$$\theta \approx \frac{v}{v_t} \quad (16)$$

где v - наблюдаемая относительная скорость между ИСО, возникающая при сравнении реконструкций.

Поскольку вся наблюдаемая событийность формируется в проекциях на выбранную фолиацию, операциональная согласованность требует, чтобы при $v \rightarrow 0$ - то есть при бесконечно малом повороте - событийные структуры в обеих ИСО становились неразличимыми:

$$\lim_{v \rightarrow 0} (C_{\mathbf{n}} \Delta C_{\mathbf{n}'}) = 0 \quad (17)$$

где $C_{\mathbf{n}}$ - причинно допустимая событийная структура, а Δ - симметрическая разность множеств событий.

Это возможно только в том случае, если масштаб времени v_t в реконструкции совпадает с максимально допустимой скоростью причинного

взаимодействия v_{\max} , которая, в силу $O(4)$ -симметрии модели, одинакова во всех ИСО.

Физическая интерпретация. Если бы $v_t < v_{\max}$, реконструируемое время оказалось бы избыточным для фиксации причинных связей: наблюдатель мог бы не включить допустимое взаимодействие в событийную структуру. Если же $v_t > v_{\max}$, он допустил бы связи, не согласующиеся с реконструкциями в других ИСО. В обоих случаях даже бесконечно малый поворот фолляции вызвал бы несогласованность памяти и событий, что операционально недопустимо.

Следовательно, совпадение реконструкций при $v \rightarrow 0$ требует:

$$v_t = v_{\max} \tag{18}$$

Таким образом, преобразования Лоренца следуют из:

- линейности наблюдаемых преобразований между фолляциями;
- существования предельной скорости распространения причинности, одинаковой во всех реконструкциях.

Эти два условия не вводятся априори, а выводятся из операциональных требований согласованности реконструкции событийности при переходах между ИСО.

6.4 Вывод

Таким образом, преобразования Лоренца, два постулата СТО и существование предельной скорости следуют не из постулируемой структуры пространства-времени, а из трёх операциональных оснований:

- евклидовой симметрии базового поля,
- операционального определения событий через наблюдателя,
- независимого применения причинности в каждой ИСО.

Полученные преобразования формально совпадают с преобразованиями Лоренца при замене $c \mapsto v_{\max}$, и описывают наблюдаемую структуру событийности в каждой ИСО как эмерджентную, без привлечения априорной метрики или времени. Это демонстрирует, что специальная теория относительности эмерджирует как операционально согласованная структура в безвременной модели с единственным уравнением Лапласа.

7 Операциональная память и согласованность событийности при смене ИСО

7.1 Модовое состояние и операциональная запись событий

В данной модели наблюдатель не является внешним по отношению к полю: его тело формируется как локализованная структура коэффициентов мод в выбранной фолиации поля $\Phi(x)$. Все события - это операционально определённые совпадения мод наблюдателя с модами поля, локализованные в гиперплоскостях, ортогональных направлению фолиации, в соответствии с определением события и уравнением (8).

При этом следует чётко различать:

- **Локальное модовое состояние** - совокупность коэффициентов разложения поля $\Phi(x)$, описывающая устойчивую конфигурацию тела наблюдателя в фиксированной фолиации. Это состояние представляет собой физически определённую локализованную структуру в E^4 , не обладающую абсолютной событийной интерпретацией вне контекста выбранной фолиации;
- **Операциональную запись событий** - множество взаимодействий, интерпретируемых наблюдателем как события, возникающее при реконструкции причинно-событийной структуры на основе модового состояния относительно выбранной фолиации. Эта запись зависит от направления фолиации и может изменяться при переходе между ИСО.

Таким образом, память наблюдателя не задаётся как внешняя глобальная структура, а формируется как результат интерпретации собственного модового состояния в заданной операциональной системе отсчёта. Операциональная запись не сохраняется при переходе между ИСО, но должна быть согласованной с модами наблюдателя, реконструируемыми в новой фолиации. В этом смысле события не обладают абсолютной онтологической стабильностью: они являются функцией операционального контекста реконструкции.

7.2 Перестройка событийной структуры при смене фолиации

Пусть наблюдатель переходит от одной инерциальной системы отсчёта (ИСО), связанной с направлением фолиации n_A , к другой ИСО с на-

правлением n'_A , отличающимся на конечный угол. При этом глобальное поле $\Phi(x)$ остаётся неизменным, но модовая структура тела наблюдателя, определяемая локализованным разложением на новой фолиации, трансформируется.

Поскольку реконструкция событий осуществляется через сравнение мод тела и окружающего поля, переход к новому базису приводит к изменению множества операционально значимых совпадений. Это имеет следующие последствия:

- *Частичное исчезновение событий*: некоторые события, реконструированные в прежней ИСО, перестают удовлетворять условиям совпадения в новом базисе;
- *Появление новых событий*: модовая конфигурация в новой ИСО может порождать дополнительные операционально допустимые совпадения, не зарегистрированные ранее.

Таким образом, переход между ИСО не приводит к переносимой абсолютной памяти, а требует перестройки событийной структуры на основе преобразования локализованного разложения. Эта перестройка не означает нарушения согласованности, поскольку осуществляется в соответствии с внутренней структурой поля и направлением операциональной реконструкции.

В общем случае, особенно при наличии нелокальных связей или агрегации мод, реконструкция может осуществляться не на уровне отдельных коэффициентов, а на основе эффективных модовых обобщений. В таких случаях события определяются не точно, а как структурные элементы в пространстве возможных согласованных проекций поля.

7.3 Вывод

Операциональная память в модели не является абсолютной или инвариантной структурой. Она возникает как результат локальной интерпретации внутреннего модового состояния наблюдателя и, следовательно, перестраивается при смене фолиации. Это отражает фундаментальную несводимость событийности к глобальному множеству и подчёркивает эмерджентный характер причинных структур.

8 От евклидовой к минковской динамике (эскиз)

8.1 $O(4)$ -симметричное усреднение и эффективное действие

На основе единственного решения уравнения Лапласа $\Phi(x)$ наблюдатель выделяет фолиацию гиперплоскостями $\Sigma^3(s)$, ортогональными к выбранному направлению \mathbf{n} . На каждой гиперплоскости Σ^3 поле разлагается по ортонормированному базису функций:

$$\Phi(x)|_{\Sigma^3} = \sum_n a_n(s) u_n(x) \quad (19)$$

где $u_n(x)$ - фиксированный базис на гиперплоскости, а $a_n(s)$ - соответствующие коэффициенты.

Операциональная реконструкция предполагает существование оператора переноса вдоль \mathbf{n} , определяющего эволюцию коэффициентов при сдвиге фолиации:

$$\frac{da_n(s)}{ds} = H_{nm} a_m(s) \quad (20)$$

где H_{nm} - некоторый (в общем случае не скалярный) оператор, эффективное выражение которого зависит от локальной структуры $\Phi(x)$ и выбора базиса. Это выражает локальное выполнение принципа причинности: в рамках каждой ИСО наблюдатель способен последовательно восстанавливать упорядоченную событийность по мере изменения модового содержания при сдвиге фолиации.

Аналогично, можно ввести эффективное действие S_{eff} , определяющее динамику коэффициентов $a_n(s)$ при переходе от евклидовой структуры к минковской. Такая реконструкция требует обоснования перехода от статического поля к параметризованной динамике, что достигается через укрупнение описания (coarse-graining).

Пусть наблюдатель не чувствителен к полной модовой структуре поля, а только к некоторому ограниченному подмножеству $\{a_n\}$, с $n \in \mathcal{N}_{\text{eff}}$. Тогда эффективная динамика задаётся как интегрирование по подавленным модам, приводящий к действию:

$$e^{-S_{\text{eff}}[a]} = \int \mathcal{D}\Phi_{\perp} \delta(\Phi - \Phi_{\text{full}}[a, \Phi_{\perp}]) e^{-\int (\nabla\Phi)^2 d^4x}. \quad (21)$$

Таким образом, S_{eff} задаёт операционально наблюдаемую эволюцию и определяет структуру взаимодействий между модами в рамках реконструируемой динамики.

8.2 OS-положительность и Wick-ротация

Благодаря линейности уравнения Лапласа и $O(4)$ -симметрии модели, корреляционные функции эффективных коэффициентов разложения обладают отражательной симметрией и положительной определённой. Эти свойства соответствуют условиям Osterwalder–Schrader-положительности [13], необходимым для корректной Wick-ротации и перехода к минковской унитарной динамике.

При выполнении этих условий переход

$$s \mapsto it \tag{22}$$

даёт возможность реконструкции уравнений динамики, в которых параметр t играет роль физического времени в реконструированной минковской структуре.

8.3 Появление светового конуса и масштаба v_t

Ограничение на максимальную операциональную скорость взаимодействий $v_t = v_{\max}$ задаёт масштаб реконструируемого причинного конуса, аналога светового конуса при условии $v_{\max} = c$. В пределах этого ограничения можно построить аналог гиперповерхности постоянного времени и структуру причинного конуса:

$$(x - x')^2 - v_t^2(t - t')^2 = 0 \tag{23}$$

что определяет наблюдаемую границу между причинно связными и несвязными событиями в реконструированной динамике.

Появление v_t как операционально выделенного масштаба в реконструкции делает возможным согласование реконструируемых уравнений движения с инвариантностью преобразований Лоренца.

Таким образом, даже при отсутствии фундаментального времени и метрики Минковского, модель допускает эмерджентную динамику, локально описываемую минковскими уравнениями эффективных полей.

8.4 Гравитационная реконструкция и принципы эквивалентности

В данной модели пространство-время возникает как эмерджентная структура, определяемая операциональной фолиацией и спектральным усреднением базового скалярного поля $\Phi(x)$, удовлетворяющего уравнению

Лапласа в \mathbb{E}^4 . Ранее было показано, как возникает эффективная метрика, согласованная с преобразованиями Лоренца и локально описываемая структурой Минковского пространства.

Модель допускает обобщение на случай перехода от плоских гиперплоскостей к искривлённым гиперповерхностям фолиации. Это приводит к кривизне в реконструируемой эмерджентной метрике $g_{\mu\nu}$, интерпретируемой операционально как гравитационное поле. Поскольку все физические объекты представлены как локализованные конфигурации $\Phi(x)$, их событийная структура зависит только от локальной геометрии фолиации. Таким образом, выполняется *слабый принцип эквивалентности*: траектории всех объектов определяются исключительно геометрией $g_{\mu\nu}$, независимо от их внутренней структуры.

Гравитационные эффекты в модели возникают как следствие операционального описания со стороны ускоренного наблюдателя. Изменение фолиации, соответствующее ускорению, ведёт к искривлению реконструируемой метрики без изменения фундаментального поля $\Phi(x)$, что обеспечивает эквивалентность гравитации и ускорения.

Оператор переноса $A_{\alpha\beta}[\Phi]$ (5), описывающий локальную эволюцию мод при реконструкции событийности, сохраняет универсальность при искривлении фолиации, так как зависит только от конфигурации $\Phi(x)$. Это позволяет в каждой достаточно малой области выбрать фолиацию, делающую метрику локально минковской и сохраняющую операциональные законы. Тем самым реализуется *сильный принцип эквивалентности*: локальные физические законы в свободно падающей системе неотличимы от законов в инерциальной системе без гравитации.

Наконец, в случае нелинейной реконструкции, включающей агрегаты мод и вариации фолиации, эффективное действие может включать члены, зависящие от эмерджентной кривизны R . Это открывает перспективы для изучения уравнений Эйнштейна в рамках геометрической реконструкции, что требует дальнейшего анализа.

9 Ограничения и обсуждение

9.1 Финитная память и модификация событийной структуры

Память наблюдателя в модели представлена не как абсолютный список событий, а как спектрально локализованная конфигурация мод поля тела наблюдателя. При переходе между ИСО, то есть между фолиациями, коэффициенты разложения мод $\{a_\alpha(x)\}$ и базис $\{\phi_\alpha(x)\}$ трансформиру-

ются, а следовательно трансформируется и событийная структура, интерпретируемая наблюдателем.

В частности:

- **Некоторые события исчезают** - если соответствующая комбинация мод более не проецируется в структуру, интерпретируемую как событие в новой ИСО;
- **Новые события появляются** - если в новой фолляции возникают конфигурации, интерпретируемые как детекторные сигнатуры, не имевшие аналогов в прежней структуре.

Это - неизбежное следствие конечности области операциональной чувствительности наблюдателя: он способен реконструировать только ограниченное число мод с конечной спектральной поддержкой. При повороте фолляции изменяется проекционная геометрия, и реконструкция событий должна быть согласована с новым базисом.

Таким образом:

Переход наблюдателя к новой фолляции (изменении ИСО) приводит к модификации списка событий: память не сохраняется в абсолютном смысле, а перестраивается в согласии с новой операциональной структурой.

Этот механизм обеспечивает операционально непрерывную реконструкцию событий, несмотря на отсутствие глобального пространства событий. Модель допускает строгое операциональное определение причинности в рамках каждой ИСО, но исключает существование универсальной событийной структуры, общей для всех наблюдателей.

10 Заключение и перспективы

В данной работе была рассмотрена модель, в которой фундаментальной структурой выступает вещественное скалярное поле $\Phi(x)$, удовлетворяющее уравнению Лапласа в четырёхмерном евклидовом пространстве \mathbb{E}^4 , без времени, выделенных направлений и динамики. Из анализа операционального взаимодействия наблюдателя с этим полем получены следующие основные результаты:

- Показано, что фолляция пространства наблюдателем и разложение поля на моды порождают структуру, интерпретируемую как инерциальная система отсчёта (ИСО), со своей событийностью, причинностью и инерцией.

- Выделены два типа преобразований между ИСО: прямые (сопоставляющие глобальные конфигурации поля) и наблюдаемые (выполняемые самим наблюдателем на основе собственной памяти).
- Доказано, что из евклидовой геометрии и операциональной реконструкции событийности операционально воспроизводятся оба постулата специальной теории относительности:
 - эквивалентность всех ИСО как наблюдательных фолиаций;
 - существование предельной относительной скорости v_{max} , инвариантной для всех наблюдателей.
- Получены наблюдаемые преобразования между ИСО, сохраняющие операционально определённую событийность, и показано, что они имеют форму преобразований Лоренца.
- Установлено, что память наблюдателя в модели не является абсолютной: при переходе между ИСО события могут исчезать или добавляться, а реконструкция осуществляется так, чтобы сохранять операциональную согласованность.
- Построен эскиз эффективной минковской динамики.
- Получены некоторые элементы общей теории относительности, включая вывод, а не постулирование, слабого и сильного принципов эквивалентности.

Таким образом, в модели из чисто евклидовой геометрии и линейного уравнения поля выводятся наблюдаемая структура пространства–времени Минковского типа, согласованная причинность, основы динамики и элементы общей теории относительности.

Полученные результаты демонстрируют, что модели без фундаментального времени могут быть строго согласованы с наблюдаемыми структурами пространства–времени и могут быть включены в современный теоретико-физический дискурс как непротиворечивые и перспективные. Это открывает возможность дальнейшего изучения безвременных моделей в более общем контексте, включая реконструкцию динамики, метрики и взаимодействий исключительно из геометрических и операциональных оснований.

Список литературы

- [1] Edward Anderson. The problem of time in quantum gravity. *Classical and Quantum Gravity*, 29:143001, 2012.
- [2] Fay Dowker. Causal sets and the deep structure of spacetime. *Classical and Quantum Gravity*, 15:1885–1891, 1998.
- [3] Sumati Surya. The causal set approach to quantum gravity. *Living Reviews in Relativity*, 22(1):5, 2019.
- [4] Abhay Ashtekar and Jerzy Lewandowski. Background independent quantum gravity: A status report. *Classical and Quantum Gravity*, 21:R53–R152, 2004.
- [5] Carlo Rovelli. Relational quantum mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 35:1637–1678, 1996.
- [6] L. Maoz and M. Li. On the signature of the metric. *Physics Letters B*, 356:279–285, 1995.
- [7] S. W. Hawking and G. F. R. Ellis. *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge University Press, 1973.
- [8] D. N. Page and W. K. Wootters. Evolution without evolution: Dynamics described by stationary observables. *Physical Review D*, 27:2885–2892, 1983.
- [9] Julian Barbour. The timelessness of quantum gravity: I. the evidence from the classical theory. *Classical and Quantum Gravity*, 11(12):2853–2860, 1994.
- [10] Christopher A. Fuchs, N. David Mermin, and Rüdiger Schack. An introduction to qbism with an application to the locality of quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 82(8):749–754, 2014.
- [11] Daniel R. Terno. Inconsistency of quantum–classical dynamics, and what it implies. *Foundations of Physics*, 36(1):102–111, 2006.
- [12] Jacques Pienaar. Qbism and relational quantum mechanics compared. *Foundations of Physics*, 51(5):1–18, 2021.
- [13] Konrad Osterwalder and Robert Schrader. Axioms for euclidean green’s functions. i. *Communications in Mathematical Physics*, 31(2):83–112, 1973.

А Отсутствие биекции между одиночными срезами

Рассмотрим два направления фолиации в \mathbb{E}^4 , задаваемые единичными векторами n^A и n'^A , определяющими гиперплоскости уровня $n_A x^A = s$ и $n'_A x^A = s'$ соответственно.

Пусть $\Phi(x)$ - фиксированное решение уравнения Лапласа:

$$\Delta_{\mathbb{E}^4} \Phi(x) = 0.$$

Разложим $\Phi(x)$ на гиперплоскости Σ_s и $\Sigma'_{s'}$ по ортонормированным базисам $\{\phi_\alpha\}$ и $\{\phi'_\beta\}$:

$$\Phi(x)|_{\Sigma_s} = \sum_{\alpha} a_{\alpha} \phi_{\alpha}(x), \quad \Phi(x)|_{\Sigma'_{s'}} = \sum_{\beta} a'_{\beta} \phi'_{\beta}(x).$$

Если $n^A \neq n'^A$, то базисы $\{\phi_\alpha\}$ и $\{\phi'_\beta\}$ относятся к различным координатным подпространствам, и, вообще говоря, между коэффициентами a_α и a'_β не существует биективного отображения.

Причины:

- Разные фолиации порождают разные спектры проекционных операторов. Даже при полном знании $\{a_\alpha\}$, проекция на $\{\phi'_\beta\}$ не восстанавливается без знания глобальной конфигурации $\Phi(x)$.
- Ортогональный поворот гиперплоскости соответствует несвязному преобразованию между базисами в $L^2(\mathbb{R}^3)$, где не существует конечномерного или локального оператора, осуществляющего такое отображение.
- Для общего поля $\Phi(x)$, значения на одной гиперплоскости не определяют значения на другой, если только они не принадлежат единой фолиации. Это типичная ситуация в эллиптических уравнениях.

Следовательно, нет ни биекции, ни суръекции между конфигурациями разложений по различным фолиациям. Это делает невозможной передачу информации между ИСО в терминах сопоставления событий - и обосновывает необходимость наблюдаемых преобразований, оперирующих только операционально доступными коэффициентами.

В OS-положительность для линейного лапласова поля

Для построения минковской эффективной теории из евклидовой модели необходимо, чтобы корреляционные функции, полученные из функционального интеграла с евклидовым действием, удовлетворяли условиям Остервальдера–Шрадера (OS-положительности) [13], допускающим аналитическое продолжение к причинным минковским функциям.

Рассмотрим действие

$$S[\Phi] = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{E}^4} (\partial_A \Phi(x))^2 d^4x,$$

которое соответствует решению уравнения Лапласа:

$$\Delta_{\mathbb{E}^4} \Phi(x) = 0.$$

Корреляционные функции, определяемые как функциональные интегралы

$$\langle \Phi(x_1) \cdots \Phi(x_n) \rangle = \frac{1}{Z} \int \mathcal{D}\Phi \Phi(x_1) \cdots \Phi(x_n) e^{-S[\Phi]},$$

существуют, поскольку действие положительно определено и гауссово. Это гарантирует:

- корректность определения функциональной меры;
- экспоненциальную убываемость корреляторов на больших расстояниях;
- выполнение условий OS-положительности для всех линейных наблюдаемых.

Следовательно, теоретико-полевой объект, полученный как результат усреднения (coarse-graining) от $\Phi(x)$, допускает аналитическое продолжение в область Минковского пространства по стандартной Wick-ротации.

Таким образом, линейность уравнения Лапласа и положительность евклидова действия обеспечивают фундаментальную обоснованность перехода к эффективной минковской динамике.