УДК 530.01

ТЕОРИИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Гуц А. К.[a,1]

[a] Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, 644077, Россия.

Обзор посвящен представлению различных математических описаний пространства-времени. Это пространство-время Минковского, интуиционисткое пространство-время, некоммутативное пространство-время. Обсуждается смысл идеи о нефундаментальности понятия пространства-времени, о которой в литературе говорят как о возникающем пространстве-времени. Демонстрируется пространство-время петлевой квантовой гравитации. Кратко излагается механизм возникновения гравитации и пространства-времени в рамках AdS/CFT-соответствия. Показано, как связность пространства-времени определяется мерой запутанности подсистем квантовой полевой системы.

Ключевые слова: пространство-время, Мир событий Минковского, интуицинистское пространство-время, некоммутативное пространство-время, возникающее пространство-время, AdS/CFT-соответствие, пространство-время и запутанность подсистем.

THE THEORIES OF SPACETIME

Guts A. K.[a,1]

[a] Dostoevsky Omsk State University, Omsk, 644077, Russia.

The review is devoted to the presentation of various mathematical descriptions of spacetime. This are the Minkowski spacetime, intuitionistical spacetime, non-commutative spacetime. The meaning of the idea of the non-fundamental concept of spacetime about which in the literature one speak as on the emerging spacetime is discussed. The spacetime of loop quantum gravity is demonstrated. The mechanism of the emergence of gravity and spacetime within AdS/CFT is given. It is shown as connectivity of spacetime is determined by the entanglement measure of quantum subsystems.

Keywords: space-time, World of Minkowski events, intuitionistical space-time, non-commutative space-time, emergent space-time, AdS/CFT-duality, space-time and entanglement of subsystems.

PACS: 03.30.+p,04.60.-m,04.65.+e
DOI: 10.17238/issn2226-8812.2019.4.23-47

Введение

Видимо, Минковский был первым, кто ввёл в литературу термин «пространство-время». По крайней мере, в работе [1] 1907 года он писал «Raum-Zeitpunkte» (точка пространства-времени), «Raum-Zeit-Vektor» (вектор пространства-времени).

Любая физическая теория, касающаяся пространства-времени, не имеет тех или иных скрытых ограничений, которые обнаруживаются в последующей исторической эпохе. Так пространство-время Ньютона-Галилея не имеет ограничения на скорость движения тела. Теория относительности устраняет недостаток ньютоновской теории, но не имеет ограничения, например, на топологию (форму) пространства-времени, говорящая, например о возможности обхода всей Вселенной, двигаясь всё время прямо вперед.

[1]E-mail: guts@omsu.ru

Здесь мы имеем дело с ограничениями физического характера, но в связи с математизацией (формализацией) физических теорий чаще приходится иметь дело с ограничениями математического характера.

Например, теория интуиционистского пространства-времени расширяет поле действительных чисел $\mathbb{R}$, повсеместно используемых в физике, до коммутативного кольца R, содержащего так называемые бесконечно малые числа, столь популярные в XVIII веке. Но в XIX веке ограничились в математическом анализе Ньютона-Лейбница более понятными действительными числами (и прямая стала касаться окружности только в одной точке, а не по отрезку прямой).

Появившаяся в XX веке теория некоммутативного пространства-времени оставляет коммутативность координат в «больших» масштабах, но для микромира вводит некоммутативность.

Мы видим наличие различных концепций пространства-времени, сформулированных как математические теории. Каждая из них переносится на окружающую Природу, и что самое удивительное – при достаточной привлекательности и убедительности в условиях усталости от идей старых теорий, оказавшихся *вдруг* несостоятельными, новые теории начинают рассматриваться как истинно отражающие сущность вещей в Природе и подтверждаться в эксперименте или в наблюдениях.

Как правило, успех новых теорий интерпретируется как фантастическое совпадение математики с тем, что есть в Природе. Хотя не исключено, и это противоречит подсознательной философской традиции исследователей, что Природа следует за математикой. Неосознанное желание смены теории лишь сигнализирует о том, что Природа, *обустроенная* в соответствии с прежней теорией, в чем-то и в каком-то смысле стала некомфортной как для мыслей, так и для жизни. При таком подходе к «описанию Природы» мы не оказываемся в позиции вечных троичников, которые всё время исправляют своих ошибки, о чём сокрушался космолог Мак-Витти [2, с. 21], а в позиции созидателей комфортной Природы. Другими словами, Природа, и, в частности, пространство-время, *возникают* в *соответствии* с нашими *правильными* мыслями. Природа и мысли дуальны, и это объясняет силу математики. Мир вещей – Природа и идеальный Мир мыслей разделены; мысли «живут» за гранью Мира вещей, или на (бесконечно удаленной) «границе».

Касается ли этот феномен возникновения (emergence) такого фундаментального понятия как пространство-время? Думается, что вполне возможно, что наши мысли, являясь закодированной квантовой информацией и представляющие собой запутанные квантовые подсистемы определяют структуру пространства-времени, реализуя голографический механизм посредством квантовой корреляции [3]. Не случайно, видимо, появилась парадигма *возникающего* (emergent) пространства-времени через запутанность [4].

Латинские индексы $i, j, k, ... = 0, 1, 2, 3, ..., d$, греческие $\alpha, \beta, \gamma, ... = 1, 2, 3, ..., d$.

1. Мир событий Минковского

Открытие относительности одновременности заставило сделать вывод о зависимости пространства и времени от поступательного движения, об их относительности, о наличии *связи* между ними, которая становится заметной при больших скоростях перемещений. Констатация связи между пространством и временем говорит о том, что они всего лишь разные стороны некой новой единой сущности. Эту единую сущность Минковский назвал *Миром событий*, или пространством-временем. Именно она является *физической реальностью*, а пространство и время всего лишь её тени, воспринимаемые как разные реальные сущности там, где перемещения осуществляются с очень малыми скоростями.

> «Физическое пространство и физическое время объединились в физический мир, интерпретирующий геометрическое пространство четырех измерений» (А.А. Фридман, 1923, [5, с. 59]).

Пространство-время само по себе лишено того, что мы интуитивно понимаем под временем. Время, как и пространство, появляется только при осознании части Мира событий.

> «Сценой действия реальности является не трехмерное евклидово пространство, а четырёхмерный мир, в котором неразрывно связаны вместе пространство и время. Однако глубока пропасть, отделяющая интуитивную сущность пространства от интуитивной сущности времени в нашем опыте, и ничто из этого качественного различия не входит в объективный мир, который удалось выкристаллизовывать физике из непосредственного опыта. Это четырёхмерный континуум, который не является ни «временем», ни «пространством». Только сознание, которое схватывает часть этого мира, испытывает обособленный кусок, который ему приходится встретить и оставить позади себя как историю, т. е. как процесс, который протекает во времени и имеет место в пространстве» (Г. Вейль, 1923, [6, с. 218]).

В этом высказывании Вейля прослеживается конструкция *возникающих* пространства и времени, точнее, *возникающего* пространства-времени, в силу наличия сознания (мыслей) где-то *за гранью* Мира вещей.

Впервые Мир событий был описан в докладе Германа Минковского. Этот доклад был сделан 21 сентября 1908 года на 80-м собрании немецких естествоиспытателей и врачей в Кёльне [7].

Доклад Минковского вызвал широкий резонанс научной общественности. Но задолго до Минковского и Эйнштейна об едином 4-мерном пространстве-времени писали М. Аксенов, Паладьи и Мах (см. [8]).

1.1. Абсолютность пространства-времени Минковского

Мир событий Минковского – это совокупность всех событий во Вселенной, которые были, есть и будут, где бы пространственно они ни находились.

Герман Минковский, который осознанно ввел в научное употребление это понятие, воспринимал Мир событий как сущность, объединяющую воедино время и пространство. Он сразу математизировал Мир событий, оснастив его геометрией четырёхмерного псевдоевклидова пространства сигнатуры $(+---)$. Таким образом, пространство-время Минковского – это 4-мерное арифметическое пространство $\mathbb{R}^4$ и, следовательно, *событие* $x \in \mathbb{R}^4$ *описывается четырьмя действительными числами* (x^0, x^1, x^2, x^3), а псевдоевклидова метрика имеет вид

$$ds^2 = \eta_{ik} dx^i dx^k = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Математизированный Мир событий будем, как правило, называть *Миром Минковского* или *пространством-временем Минковского.*

Если быть точным, то Минковский использовал не слово «событие», а слова *мировая точка* и говорил о *мире.* В мировую точку он, «чтобы не оставлять зияющей пустоты», помещает некоторый объект наблюдения, который он называет, избегая конкретизации в форме материя или электричества, «субстанцией». Позже «субстанциональные точки» Минковского были названы событиями.

Пространство-время Минковского *абсолютно*, т. е. в смысле бытия события прошлого, настоящего и будущего неразличимы. Они всегда *есть*, или *присутствуют.*

С точки зрения математики *абсолютность пространства-времени* – это инвариантность 4-мерного интервала $ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$, имеющего смысл «расстояния» между двумя событями (t, x, y, z) и $(t + dt, x + dx, y + dy, z + dz)$, относительно преобразований Лоренца

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \dfrac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}.$$

При этом отрезки времени dt и длины $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ уже не являются инвариантными относительно преобразований Лоренца. Поэтому говорят об *относительности* времени и пространства.

Представление о пространстве-времени, которому мы обязаны Минковскому, является основой общей теории относительности, которая излагается как 4-мерное лоренцево многообразия с метрикой, удовлетворяющей уравнениям Эйнштейна.

1.2. Фундаментальность пространства-времени Минковского

Пространство-время Минковского *фундаментально*, т. е. является основой для всевозможных физических теорий и описаний Внешнего мира, или физической Реальности.

До Минковского фундаментальными считали пространство и время. Кант считал их априорными, данными человеку изначально, от рождения; это очки, через которые человек видит, воспринимает и описывает Внешний мир. Энгельс объявил пространство и время формами существования материи. Последнее близкó к воззрениям большинства физиком, поскольку, как правило, они являются материалистами, хотя и не осознающими свою философскую позицию.

1.3. Реальность пространства-времени Минковского

Теория *абсолютного* пространства-времени уверяет, что события прошлого и будущего столь же *реальны*, сколь реальны события настоящего.

> В абсолютном пространстве-времени ничего не происходит – в абсолютном пространстве-времени всё (уже) существует.

Другими словами, будущие события и события прошлого доступны наблюдению в той же мере, как и события настоящего. При этом, конечно, следует уточнить, что мы понимаем под наблюдением. Ведь, к примеру, мой знакомый, в данный момент живущий в США, столь же реален, как и я, он часть моего настоящего, но это не значит, что я могу его видеть «живьем», хотя его наблюдение возможно, скажем, посредством телефонного разговора. В отношении событий будущего (прошлого) также надо понять, как осуществляется «телефонный разговор».

Если не будет предъявлено фактов таких наблюдений, то теорию абсолютного пространства-времени придется признать удобной геометрической иллюстрацией. Тем более, что «с точки зрения здравого смысла более вероятно, что в реальном мире существуют отдельно трёхмерное физическое пространство и одномерное физическое время, что понятие пространства-времени – это лишь некая научная абстракция» (Мостепаненко [9, с.47]) [1].

2. Интуиционистский Мир событий Минковского

Каждое событие x в пространстве-времени Минковского описываются кортежем (x^0, x^1, x^2, x^3), где $x^i \in \mathbb{R}$ – действительное число. Однако, возможен путь рассмотрения иного Мира событий, в котором каждое событие задается кортежем (x^0, x^1, x^2, x^3), где x^i – число, принадлежащее не полю $\mathbb{R}$, а кольцу R, на котором построен *инфинитезимальный анализ Кока-Ловера*. Эта смена математической основы, *математического фундамента* имеет кардинальные последствия в описании физической реальности, и, более того, влечет *смену логики рассуждений* о Внешнем мире.

[1] Одновременно здравый смысл уверяет нас, что Солнце вращается вокруг Земли, и в этом может убедиться каждый человек – достаточно понаблюдать за движением Солнца на небосводе.

2.1. Инфинитезимальный анализ Кока-Ловера

Основным для анализа Кока-Ловера является замена поля действительных чисел $\mathbb{R}$ на коммутативное кольцо R. В идеале хотелось бы, чтобы оно удовлетворяло следующим аксиомам[2]:

(A1) $\langle R, +, \cdot, 0, 1\rangle$ – коммутативное кольцо.

(A2) R – локальное кольцо, т.е.

$$0 = 1 \Longrightarrow \bot$$
$$\exists y\ (x \cdot y = 1) \vee \exists y\ (1 - x) \cdot y = 1.$$

(A3) $\langle R, <\rangle$ – действительное евклидово упорядоченное локальное кольцо, т. е. $<$ – транзитивное отношение, совместимое с кольцевой структурой в том смысле, что

$$(a)\ 0 < 1,\ (0 < x\ \&\ 0 < y \Longrightarrow 0 < x + y\ \&\ 0 < x \cdot y),$$
$$(b)\ \exists y(x \cdot y = 1) \Longleftrightarrow (0 < x \vee x < 0),$$
$$(c)\ 0 < x \Longrightarrow \exists y(x = y^2)\ \text{(евклидовость)}.$$

(A4) $\leq$ – предпорядок, совместимый с кольцевой структурой, т. е. рефлексивное и транзитивное отношение, и

$$(a)\ 0 \leq 1,\ (0 \leq x\ \&\ 0 \leq y \Longrightarrow 0 \leq x + y\ \&\ 0 \leq x \cdot y),\ 0 \leq x^2,$$
$$(b)\ (x - \text{нильпотент, т. е. } x^n = 0) \Longrightarrow 0 \leq x.$$

(A5) $<$ и $\leq$ – совместимы, т.е.

$$(a)\ x < y \Longrightarrow x \leq y,$$
$$(b)\ x < y\ \&\ y \leq x \Longrightarrow \bot.$$

(A6) (**Аксиома Кока-Ловера**).

$$\forall(f \in R^D)\exists!(a, b) \in R \times R \forall d \in D(f(d) = a + b \cdot d),$$

где $D = \{x \in R : x^2 = 0\}$.

Кольцо R, **дополнительно** к обычным действительным числам из $\mathbb{R}$, располагает ещё элементами, называемыми ***инфинитезималами*** и входящими в «множества»

$$D = \{d \in R : d^2 = 0\},\quad ...,\quad D_k = \{d \in R : d^{k+1} = 0\}, ...,$$

$$\mathbb{\Delta} = \{x \in R : f(x) = 0,\ \forall f \in m_0^g\},$$

где $m_{\{0\}}^g$ – идеал функций, имеющих нулевой росток в 0 [3], причём

$$D \subset D_2 \subset ... \subset D_k \subset ... \subset \mathbb{\Delta}.$$

Это означает, что в пространстве-времени R^4 помимо событий с координатами (x^0, x^1, x^2, x^3), где x^i – действительные числа, имеется множество событий с координатами $(x^0+d_0, x^1+d_1, x^2+d_2, x^3+d_3)$, где $d_i \in D$, т. е. с бесконечно малыми добавками.

Легко доказывается, что, во-первых, равенство $D = \{0\}$ невозможно, а во-вторых, **аксиома Кока-Ловера** (A6) **несовместима с законом исключённого третьего** и что в теории анализа Кока-Ловера неприемлемы рассуждения с использованием классической логики.

[2] Мы приводим только часть аксиом. Другие аксиомы см. в [10, Гл.VII].
[3] Иначе говоря, исчезающих в некоторой окрестности точки 0.

Логика анализа Кока-Ловера интуиционистская! В нём с каждым действительным числом a можно рассматривать числа вида $a + d$, где $d \in D$. К чему это приводит? Мир событий становится *многовариантным*, *множественным* при его интерпретации в терминах привычного нам математического (действительного) анализа Ньютона–Лейбница.

Переход к интерпретация означает, что анализ Кока-Ловера мы рассматриваем как формальную теорию, каждому объекту которого ставится в соответствие объект действительного анализа.

2.2. Интерпретации. Стадии

Аксиоматически изложенный анализ Кока-Ловера – это чисто формальная теория $\mathcal{T}$, практическое применение которой, как известно из математической логики, требует придания смысла, значения формулам теории.

Это делается с помощью построения конкретной *интерпретации* (модели) $\mathcal{M}$ теории $\mathcal{T}$, или, символически

$$i : \mathcal{M} \models \mathcal{T}.$$

Интерпретации важны: они наполняют теорию конкретным содержанием, позволяющим судить о непротиворечивости теории.

Известно, что формальная теория может иметь множество различных интерпретаций. В нашем случае интерпретация теории определяется тем, какое кольцо будет выбрано в качестве интерпретации кольца R. Как было показано, мы не можем использовать теоретико-множественный язык. Иначе говоря, R не может быть множеством действительных чисел $\mathbb{R}$, а отношение принадлежности $x \in R$ не может интерпретироваться как двузначное отношение «да-нет». Иначе говоря, проинтерпретированное формальное пространство-время R^4 не может быть пространством-временем Минковского $\mathbb{R}^4$.

Таким образом, мы должны покинуть привычную для математики XX века теорию множеств **Sets**, являющуюся так называемой *категорией*, объекты которой, именуемые множествами, совершенно не подходят для интерпретации кольца R.

Известно, что наиболее близкой к категории теории множеств **Sets** являются категории, известные как *топосы* (см. [11]).

2.3. Топос $\mathbf{Sets}^{\mathbf{L}^{op}}$ как интерпретация анализа Кока-Ловера

Выбираем для интерпретации гладкого анализа Кока-Ловера гладкие топосы (см. [10]), а конкретно топос

$$\mathbf{Sets}^{\mathcal{L}^{op}}.$$

Здесь $\mathcal{L}$ – это дуальная категория для категории конечно порождённых C^∞-колец. Она называется *категорией локусов* [10]. Объектами категории $\mathcal{L}$ являются всё те же конечно порождённые C^∞-кольца, а морфизмами – обращённые морфизмы категории конечно порождённых C^∞-колец. Во избежание путаницы принято объекты (локусы) категории $\mathbf{L}$ обозначать как ℓA, где A – C^∞-кольцо. Следовательно, $\mathcal{L}$-морфизм $\ell A \to \ell B$ – это C^∞-гомоморфизм $B \to A$.

Конечно порождённое C^∞-кольцо ℓA изоморфно кольцу вида $C^\infty(\mathbb{R}^n)/I$ (для некоторого натурально числа n и некоторого конечно порождённого идеала I).

При интерпретации

$$i : \mathbf{Sets}^{\mathcal{L}^{op}} \models \mathcal{T}$$

кольцу R отвечает функтор $F_R = i(R)$.

Интерпретация отношения $x \in R$. При интерпретации i элементам x кольца R ставятся в соответствие «элементы» $i(x)$ функтора F_R из $\mathbf{Sets}^{\mathcal{L}^{op}}$. Но сделать это не так просто, потому что функтор F_R определён на категории локусов $\mathcal{L}$:

$$F_R : \mathcal{L} \to \mathbf{Sets},$$

т.е. переменной (аргументом) является произвольный локус ℓA, а значением – множество $F(\ell A) \in$ **Sets**.

Выход из затруднения заключается в определении *обобщённых элементов* $f \in_{\ell A} F_R$ функтора F_R.[4]

Обобщённым элементом $f \in_{\ell A} F$, или *элементом f функтора F в стадии (at stage) ℓA*, называется элемент $f \in F(\ell A)$.

Теперь сопоставляем элементу $x \in R$ обобщённый элемент $i(x) \in_{\ell A} F_R$. Но, как видим, таких элементов $i(x)$ столько, сколько локусов. При переходе к интерпретации (модели) $\mathbf{Sets}^{\mathcal{L}^{op}}$ происходит «размножение» элемента x. Он начинает существовать в **бесконечном числе вариантов**

$$\{i(x) : i(x) \in_{\ell A} F_R, \ell A \in \mathcal{L}\}.$$

Размножение идёт за счет зависимости от выбора стадии. Изобразим эту зависимость как

$$i(x) = i(x)(\ell A).$$

2.4. Координаты событий и метрика интуиционистского пространства-времени

Из сказанного выше следует, что в случае стадии $\ell A = \ell C^\infty(\mathbb{R}^m)$ *событие x в (интуиционистском) пространстве-времени $i(R^4)$ описывается четырьмя гладкими функциями* $(x^0(a), x^1(a), x^2(a), x^3(a))$, $a \in \mathbb{R}^m$, а метрика $g^{(4)}$ в R^4 интерпретируется как метрика в $\mathbb{R}^4$, имеющая вид

$$g^{(4)}(\ell A) = [g \in_{\ell A} R^{R^4 \times R^4}] \equiv g^{(4)}_{ik}(a) dx^i dx^k,$$

$$a = (a^1, ..., a^m) \in \mathbb{R}^m,$$

и зависящая от дополнительных «скрытых» параметров $a = (a^1, ..., a^m) \in \mathbb{R}^m$. Но есть еще представления события x и в других стадиях.

Если рассматривать метрику, зависящую ещё от точки $x = (x^0, ..., x^3)$ пространства-времени R^4, то

$$g^{(4)}(x)(\ell A) = [g(x) \in_{\ell A} R^{R^4 \times R^4}] \equiv g^{(4)}_{ik}(x^0, ..., x^3, a) dx^i dx^k.$$

Зависимость 4-метрики не только от пространственно-временных координат, но ещё от дополнительных параметров $a = (a^1, ..., a^m)$ может трактоваться как указание на существование дополнительных измерений, идущих вдоль *балка*, число которых определяется выбором стадии из бесконечного количества различных стадий.

2.5. Фундаментальность интуиционистского пространства-времени Минковского

Интуиционистское пространство-время Минковского R^4 также фундаментально в том смысле, что является основой для любых физических теорий и описаний физической реальности. Но... основа эта состоит из кирпичной кладки классического пространства-времени Минковского, в которой произошла замена «логического кирпича». Хотя можно сказать, что заменен был «числовой кирпич»: вместо $\mathbb{R}$ вставили R. Это приводит к тому, что если под фундаментальностью понимать уникальность, или единственность, то это исчезает при рассмотрении событий в разных стадиях.

3. Некоммутативное пространство-время

До сих пор мы рассматривали координаты событий, которые являются числами *коммутативных* алгебраических объектов. Оправдано ли это?

[4] Кроме обозначения для обобщённого элемента $f \in_{\ell A} F_R$, используется и другое обозначение, которое имеет вид $f : \ell A \to F_R$.

Впервые идею о некоммутативной структуре для пространственно-временных координат в *очень малых масштабах* высказал Гейзенберг. Снайдер реализовал эту идею в статье [12]. Переход к некоммутативности был мотивирован необходимостью устранять расходимости, которые преследовали квантовые теории, такие как, например квантовая электродинамика, с самого начала.

3.1. Дискретное некоммутативное пространство-время Снайдера

Как правило, используемое исследователями пространство-время является континуумом, т. е. «непрерывной протяженностью», и требование его лоренц-ковариантности не является обязательным. Предполагая некоммутативность координат, Снайдер строит пример лоренц-инвариантного дискретного пространства-времени.

Ставится задача: пусть x, y, z и t – эрмитовы операторы для пространственно-временных координат в каждой конкретной лоренцевой системе отсчета; спектр каждого из этих операторов состоит из возможных результатов измерения соответствующей величины. Операторы x, y, z и t должны быть такими, чтобы спектры операторов x', y', z' и t', образованные с помощью линейных комбинаций спектров x, y, z и t, оставляли квадратичную форму

$$s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

инвариантной.

Другими словами, мы предполагаем, что спектры операторов координат пространства-времени инвариантны относительно преобразований Лоренца.

Очевидно, что пространственно-временной континуум Минковского удовлетворяет приведенному выше определению. Однако это не единственное решение поставленной задачи.

Основной результат, полученный Снайдером в статье [12], заключается в том, что существует лоренцево инвариантное дискретное пространство-время, в котором существует естественная единица длины. Снайдер выражал надежду, что введение такой единицы длины устранит многие проблемы квантовой теории поля.

3.2. Современное описание некоммутативного пространства-времени

Предположение о некоммутативности пространства-времени возникает при рассмотрении релятивистского варианта алгебры Гейзенберга

$$[p_j, x_i] = i\hbar\eta_{ji},$$

и, в частности,

$$[p_0, x_0] = i\hbar$$

Из последнего равенства следует соотношение неопределённостей для времени и энергии:

$$\Delta t \Delta E > \hbar.$$

Отсюда видно, что в очень малых областях пространства-времени имеем гигантские значения для энергии, что влечет большие колебания гравитационного поля, возможно, образование микрочерных дыр, и, следовательно, искажения геометрии пространства-времени. Последнее вполне может означать нарушение коммутативности координат x^i, в масштабах порядка длины Планка. То есть коммутатор $[x_i, x_j]$ не может быть строго нулевым, а геометрия пространства-времени становится некоммутативной.

В силу сказанного, постулируется, что координаты пространства-времени принадлежат некоторой некоммутативной алгебре. Точнее, координаты становятся операторами, $x^i \to \hat{x}^i$, и подчиняются коммутационным соотношениям следующего вида:

$$[\hat{x}^i, \hat{x}^k] = i\theta^{ik},$$

где θ^{ik} – это антисимметричный лоренц-инвариантный тензор второго порядка.

Таким образом, *событие* $\hat{x}$ *в некоммутативном пространстве-времени описывается четырьмя операторами* $(\hat{x}^0, \hat{x}^1, \hat{x}^2, \hat{x}^3)$.

3.3. Построение теории поля в некоммутативном пространстве-времени

Построение теории поля в некоммутативном пространстве-времени сводится к использованию теории поля в пространстве-времени Минковского: полю от операторных переменных сопоставляется это же поле, но от обычных координат. Причем произведению двух полей $\phi(\hat{x})$ и $\psi(\hat{x})$ ставится в соответствие $*$-произведение Мояла (Moyal) этих же полей, зависящих уже от комутирующих переменных:

$$\phi(\hat{x})\psi(\hat{x}) = \phi(x) * \psi(x) =$$
$$= \exp\left(i\theta^{mn}\frac{\partial}{\partial x^m}\frac{\partial}{\partial y^n}\right)\phi(x)\psi(y)\,|_{y\to x} = \phi(x)\psi(x) + \frac{i}{2}\theta^{mn}\frac{\partial\phi(x)}{\partial x^m}\frac{\partial\psi(x)}{\partial x^n} + O(\theta^2). \tag{1}$$

3.4. Каноническая гравитация в некоммутативном пространстве-времени

Каноническая формулировка общей теории относительности (ОТО) в некоммутативном пространстве-времени получается заменой всех обычных величин величинами, зависящими от некоммутативных координат:

$$h_{\alpha\beta}(t,x) \to h_{\alpha\beta}(\hat{t},\hat{x}), \quad \pi^{\alpha\beta}(t,x) \to \pi^{\alpha\beta}(\hat{t},\hat{x}).$$

Действие Эйнштейна-Гильберта имеет вид:

$$S^{\theta}_{TH} = \frac{1}{16\pi G}\int\left(\pi^{\alpha\beta}_{\theta} * \dot{h}^{\theta}_{\alpha\beta} - N * \bar{\mathcal{H}} - N^{\alpha} * \bar{\mathcal{H}}_{\alpha}\right)dtd^3x. \tag{2}$$

Поскольку действие Эйнштейна-Гильберта (2) в канонической формулировке на некоммутативном пространстве-времени содержит много величин, которые необходимо обобщить на некоммутативное пространство-время сами по себе, $\pi^{\alpha\beta}_{\theta}$, $\dot{h}^{\theta}_{\alpha\beta}$, $\bar{\mathcal{H}}$ и $\bar{\mathcal{H}}_{\alpha}$, то эти обобщенные величины должны быть определены для формулы (2) явно. Используем для этого формулу (1). В таком случае, например обобщенная каноническая сопряженная переменная $\pi^{\alpha\beta}$ определяется следующим выражением:

$$\pi^{\alpha\beta}(\hat{t},\hat{x}) = \frac{\sqrt{h}}{16\pi G} * (K^{\alpha\beta} - K * h^{\alpha\beta})(\hat{t},\hat{x}) =$$
$$= \frac{\sqrt{h}}{16\pi G}(K^{\alpha\beta} - Kh^{\alpha\beta}) + \frac{i}{32\pi G}\theta^{\mu\nu}\left(\frac{\partial_\mu h}{2\sqrt{h}}\partial_\nu K^{\alpha\beta} - \frac{\partial_\mu h}{2\sqrt{h}}\partial_\nu K h^{\alpha\beta} - \frac{\partial_\mu h}{2\sqrt{h}}K\partial_\nu h^{\alpha\beta} - \sqrt{h}\partial_\mu K\partial_\nu h^{\alpha\beta}\right) +$$
$$+ O(\theta^2) = \pi^{\alpha\beta}_{\theta 0}(t,x) + \pi^{\alpha\beta}_{\theta 1}(t,x) + O(\theta^2).$$

Аналогичные определения делаются и для $\dot{h}_{\alpha\beta}(\hat{t},\hat{x})$, $\bar{\mathcal{H}}$ и $\bar{\mathcal{H}}_{\alpha}$. Но они гораздо более громоздкие и их можно найти в статье [13].

В результате имеем теорию гравитации в некоммутативном пространстве-времени, допускающую, однако, представление в обычном коммутативном пространстве-времени с помощью формулы (1).

По этой же схеме строятся каноническая теория квантовой гравитации и теория петлевой квантовой гравитации [13].

3.5. Фундаментальность некоммутативного пространства-времени Минковского

Мы думаем, что некоммутативное пространство-время Минковского остается фундаментальным физическим понятием. Меняется только арифметика координат событий. При перемножении они перестают быть коммутативными. Однако, исследователи, изучающие некоммутативное пространство-время, заговорили о *возникновении* пространства-времени, о его вторичности, нефундаментальности.

3.6. Некоммутативность и возникновение пространства-времени

Ограничимся двумя цитатами, автор которых увязывает гипотезы о некоммутативности пространства-времени, о *возникающем* пространстве-времени и о мультивселенной картине Внешнего мира, или Мира вещей. Подробнее о концепции возникающего пространства-времени и о том, что под этим может пониматься поговорим чуть ниже.

«Некоммутативное пространство-время обязательно подразумевает *возникающее пространство-время*, если, конечно, пространство-время в микроскопических масштабах рассматривается как некоммутативное. Поскольку возникающее пространство-время – это новая фундаментальная парадигма для квантовой гравитации, необходимо пересмотреть все обоснования для введения мультивселенной гипотезы с точки зрения возникающего пространства-времени» [14].

«Возникающее пространство-время, безусловно, открывает новую перспективу, ставит под сомнение все обоснования введения мультивселенной картины мироздания. Более того, возникающее пространство-время может спасти нас от конца света метастабильной мультивселенной, как это делала квантовая механика в случае катастрофического коллапса классических атомов» [14].

4. Возникающее пространство-время

Минковский реальным, самостоятельным объявил пространство-время, а пространство и время «должны погрузиться в тень». Иначе говоря, фундаментально только пространство-время; оно есть основа для любых рассуждений. А сами по себе пространство и время возникают в сознании наблюдателя, находящегося в пространстве-времени.

Уилер в своей квантовой геометродинамике фундаментальной основой объявил пространство, а пространство-время *возникает* как результат интерференции волновых функций в суперпространстве всех 3-геометрий, заданных в пространстве. Времени в его теории нет.

Квантовая гравитация Уилера убедительна. Итак, по-крайней мере, фундаментально именно пространство.

Действительно, в последние годы стала популярным воззрение, что «пространство-время – возникающая сущность из некоторого фундаментального объекта в квантовой гравитации. Это означает, что мы не предполагаем предшествующее существование пространства-времени, но определяем **структуру** (выделение мое – А.Г.) пространства-времени как решение базовой теории, независимой от фона, такой как матричные модели» [14].

Структура пространства-времени, например топология или метрика, в математике вводится на некоторой *подложке*, которой в ОТО является канторовское множество. Элементы этого множества трактуются как события. В интуиционистской ОТО подложкой будет совокупность четверок гладких функций, а в некоммутативной теории – четверки операторов. Но возможны и другие, более утонченные подложки. В матричных моделях физическое пространство-время эффективно возникает из набора матриц, а не задается в качестве априорного многообразия. Это эффективное описание пространства-времени часто называется некоторыми авторами возникающим пространством-временем.

В квантовой геометродинамике Уилера пространство-время также возникает. Но у Уилера фундаментально пространство, и из него возникает пространство-время. Однако, если посмотреть внимательно, то мы увидим, что возникает 4-метрика из 3-метрик, заданных на 3-мерном гладком многообразии M^3, выполняющем роль подложки в квантовой гравитации Уилера-ДеВитта.

Но в наше время под возникновением пространства-времени понимается нечто более *утонченное*:

> Я почти уверен, что пространство и время являются иллюзиями. Эти примитивные понятия будут замещены чем-то более утонченным (Nathan Seiberg)

Процитированный Зейберг считает, что пространство и время, а значит и пространство-время, не должны присутствовать в исходной формулировке фундаментальной физической теории, а появляются только как макроскопическое приближение [17].

В духе Зейберга звучит следующая фраза:

> Пространство и время не является основой наших рассуждений. Напротив, пространство и время сами появляется в результате этих рассуждений. За этими рассуждениями скрывается нечто более фундаментальное (Роберт Дейкгрофф).

Эта фраза взята из популярной лекции Дейкгроффа [18]. Думается, что он, все-таки, имел в виду пространство-время.

В высказываниях Зейберга и Дейкгроффа видится желание не только отказать в фундаментальности структуре пространства-времени, но и отказаться от фундаментальности подложки, на которой реализуются структура пространства-времени. Подложка должна *возникнуть* (to emerge) из чего-то *иного*. Следует поэтому обратить внимание на работу [19], авторы которой заявляют, что что пространство-время является явлением, возникшим в предшествующей особой субквантовой среде, и что запутанность и туннельный эффект могут быть объяснены в терминах нелинейной связи между пространством и временем, обязанной субквантовым волнам.

В философии Гегеля Мир возникает по логике (а не во времени) из Ничего, которое есть чистое Бытие, и это чистое Бытие и есть подложка пространства-времени, которая в конкретном бытии может быть и «иным». Другими словами, в рассуждениях о нефундаментальности пространства-времени скрывается поиск адекватного математического описания акта, который мы называем рождением Мира. Все существующие подходы неудовлетворительны в силу того, что они отрывают материю от духа (сознания). Неудовлетворенность современными физическими теориями выросла до неудовлетворенности самим постулатом о фундаментальности пространства-времени.

Однако, при внимательном изучении вариантов теорий «возникновения пространства-времени» мы найдем в них только «слабые варианты» Риклеса (см. ниже § 6.3 и § 7), которые не покушаются на фундаментальность пространства-времени.

5. Возникновения метрики пространства-времени (гравитации) из скалярного поля

Представим еще один подход, касающийся идеи возникновения пространства-времени: «Основой для новой парадигмы о фундаментальных сущностях должно стать утверждение: «Существует возможность того, что само пространство-время в конечном счете является возникающим явлением, почти универсальным «низкоэнергетическим приближением для больших расстояний», подобно тому, как механика жидкости представляет собой почти универсальное низкоэнергетическое приближение для больших расстояний в квантовой молекулярной динамике. Если это так, то прямые попытки квантовать пространство-время ошибочны – по крайней мере, в том, что касается фундаментальной физики. В частности, это означает, что мы, возможно, совершенно неверно определили фундаментальные степени свободы, которые необходимо квантовать, и даже фундаментальную природу арены пространства-времени, в которой физика происходит» [20].

Иначе говоря, те степени свободы, которые мы отмечаем на доступных нам малых расстояниях, совсем не являются таковыми, если иметь в виду большие расстояния. Например, при квантовании пространства-времени метрика (тетрада) берется нами как степень свободы. Но если на больших расстояниях это не так, то наши попытки квантования пространства-времени, квантования его метрики являются тупиковыми.

Если идея нефундаментальности пространства-времени утвердится в физике, то в будущей формулировки фундаментальной теории не будет пространства-времени, и оно появится в качестве приблизительного, классического понятия, которое действенно только в макромире. Пространство-время всего лишь эффективный, т. е. результативный способ описания реальности (и ничего больше).

Барцело, Визер и Либерати привели доводы того, что гравитация Эйнштейна может быть новым явлением, которое не является «фундаментальным», а представляет собой почти автоматическое низкоэнергетическое дальнее следствие широкого класса теорий [21].

В частности, появление искривленной пространственно-временной «эффективной лоренцевой геометрии» является общим обобщенным результатом линеаризации классической теории скалярного поля на некотором нетривиальном фоне. Выявляется нечто более фундаментальное. При квантовании линеаризованных флуктуаций на этой фоновой геометрии однопетлевое эффективное действие гарантированно содержит член пропорциональный действию общей теории относительности Эйнштейна–Гильберта.

Посмотрим, как это достигается. Предположим, что у нас есть единственное скалярное поле ϕ, динамика которого определяется некоторым лагранжианом первого порядка $L(\phi, \partial_m \phi)$. Мы рассматриваем линеаризованные колебания вокруг некоторого фонового решения $\phi_0(t,x)$ уравнений движения, и для этого запишем

$$\phi(t,x) = \phi_0(t,x) + \varepsilon\phi_1(t,x) + o(\varepsilon^2). \tag{3}$$

Линеаризация уравнений Эйлера–Лагранжа приводит к дифференциальному уравнению второго порядка с зависимостью от ϕ_0. Определяем *эффективную метрику* пространства-времени [21]:

$$\sqrt{-g}g_{mn} = \left.\frac{\delta^2 L}{\delta(\partial_m \phi)\delta(\partial_n \phi)}\right|_{\phi_0}, \tag{4}$$

или

$$g_{mn}(\phi_0) = \left(-det\left\{\frac{\delta^2 L}{\delta(\partial_m \phi)\delta(\partial_n \phi)}\right\}\right)^{1/(d-1)}\Bigg|_{\phi_0} \left\{\frac{\delta^2 L}{\delta(\partial_m \phi)\delta(\partial_n \phi)}\right\}^{-1}\Bigg|_{\phi_0}. \tag{5}$$

Уравнение движения для линеаризованных колебаний может быть записано в геометрической форме

$$[\triangle(g_{mn}(\phi_0)) - V(\phi_0)]\phi_1 = 0, \tag{6}$$

где $\triangle$ – оператор Даламбера, ассоциированный с эффективной метрикой $g_{mn}(\phi_0)$, а $V(\phi_0)$ – потенциал, зависящий от фонового поля.

Формулы работают для любого лагранжиана, зависящего только от одного скалярного поля и его первых производных. Линеаризованное уравнение в частных производных (6) будет гиперболическим (и поэтому линеаризованные уравнения будут иметь волновую форму решения) тогда и только тогда, когда эффективная метрика g_{mn} имеет лоренцеву сигнатуру $\pm[-(+)^d]$ при $(d \neq 1)$.

Мы видим, что появление искривленной пространственно-временной «эффективной геометрии Лоренца» является общим результатом линеаризации классической теории скалярного поля на некотором нетривиальном фоне.

Теперь мы попытаемся понять, как и в какой степени можно определить динамику для этой метрики?

При квантовании линеаризованных флуктуаций вокруг фоновой геометрии $g_{mn}(\phi_0)$ однопетлевое эффективное действие имеет вид:

$$\Gamma[g(\phi_0), \phi_0] = S[\phi_0] + \hbar \int \sqrt{-g}\kappa[-2\Lambda + R(g) - 6V(\phi_0)]d^{d+1}x + \hbar X[g(\phi_0), \phi_0] + O(\hbar^2).$$

Мы видим, что, как уже говорилось, действие содержит член пропорциональный действию общей теории относительности Эйнштейна-Гильберта.

Отсюда выводим

$$\left[\kappa(G_{ik}(g) + \Lambda g_{ik}) + \frac{1}{\sqrt{g}}\frac{\delta\{X[g(\phi_0)] + Y[g(\phi_0)]\}}{\delta g_{mn}}\right]\frac{\delta g_{ik}(\phi_0)}{\delta\phi(x)} = O(\hbar).$$

Здесь член $\delta X[g(\phi_0)]/\delta g$ – это поправка к уравнениям Эйнштейна типа «квадрат кривизны», которая обычно встречается в теории струн (на самом деле почти в любой теории – кандидате на квантовую гравитацию). Заметим, что из-за члена $\delta g_{mn}(\phi_0)/\delta\phi(x)$ мы получили не обычные уравнения Эйнштейна, хотя они, конечно, воспринимаются как уравнения Эйнштейна (с усиленным вкладом кривизны). Именно в этом смысле мы можем видеть здесь структуру эйнштейновской гравитации, *возникающую* из теоретико-полевого анализа нормальной моды.

«Эта физическая картина говорит о том, что гравитация Эйнштейна является новым низкоэнергетическим явлением на больших расстояниях, которое нечувствительно к деталям физики высоких энергий на малых расстояниях» (см. подробности в [21]).

6. О возникновении пространства-времени в гипотезе AdS/CFT-соответствия

Очень часто о возникновении пространства-времени говорят специалисты в области AdS/CFT-соответствия, или AdS/CFT-дуальности. Однако они не имеют в виду отказ от фундаментальности пространства-времени: «В теории AdS/CFT-соответствия понятие *возникновения пространства-времени*, традиционно обсуждаемое в кругах AdS/CFT, означает появление дополнительных размерностей в балке из менее мерной границы» [22, p. 134].

6.1. AdS/CFT-соответствие

Напомним, что в 1997 году Малдасена опубликовал предположение [23], что теория струн в некоторой области могла бы иметь дуальное описание в терминах калибровочной теории на границе рассматриваемой области. Поскольку теория струн есть теория гравитации, т. е. есть описание геометрии пространства-времени, а калибровочная теория живет в мире без гравитации с размерностью на единицу меньшую, то появляется мысль, что пространство-время *возникает* в силу наличия калибровочного поля. Иначе говоря, пространство-время вторично, *не* фундаментально.

Малдасена рассматривал AdS/CFT-соответствие[5], т. е. дуальность наблюдаемых свойств конкретной теории струн в пространстве-времени анти-де Ситтера (AdS) и конкретной конформной теории поля (CFT), определенной на (конформной) границе пространства-времени анти-де Ситтера. Точнее, он констатировал наличие следующей эквивалентности:

$$\textbf{струны на } AdS_5 \times S^5 \longleftrightarrow 4D\ CFT \textbf{ на границе}.$$

Полю (частицам) на 4-мерной границе без гравитации, т. е. в пространстве-времени Минковского B, соответствуют струны (гравитация и др.) в балке, т. е. в 5-мерном пространстве-времени, которое локально асимптотично пространству-времени анти-де Ситтера AdS_5, т. е. в балке, с бесконечно далекой границей B (см. рис. 1, 2). Различные состояния CFT могут описывать различные геометрии пространства-времени, но для конкретного CFT асимптотическое поведение каждого из этих пространств-времен одинаково (см. рис. 2).

Изначально AdS/CFT-соответствие было сформулировано как эквивалентность теории супергравитации в пространстве-времени анти-де Ситтера AdS_5 (размерности 4+1 – четыре пространственные координаты и время) и суперконформной теории Янга-Миллса на границе пространства-времени анти-де Ситтера (размерности 3+1). Затем эта дуальность нашла свои обобщения и на другие размерности пространства-времени.

[5] Доказательство AdS/CFT-соответствия до сих пор не найдено [24].

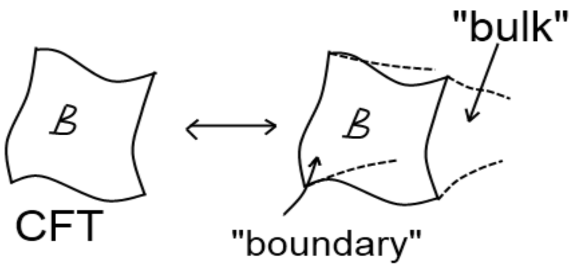

Рис. 1. AdS_5/CFT-соответствие [4]

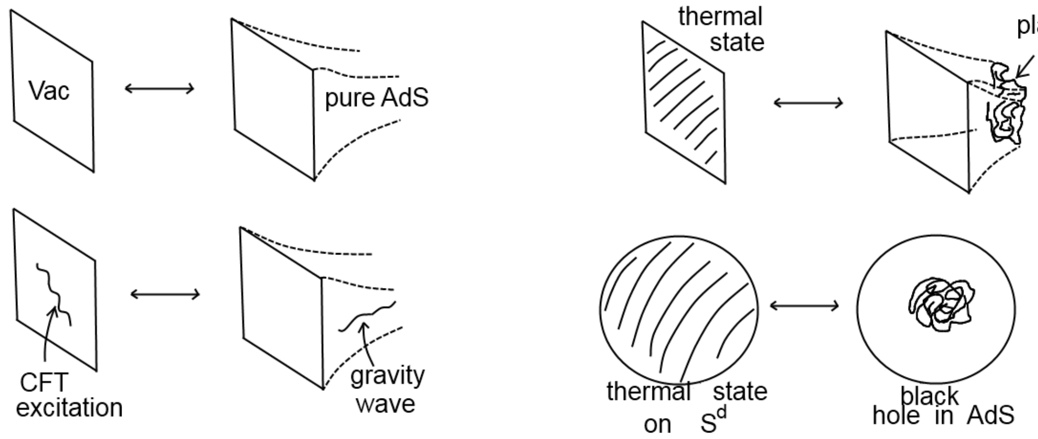

Рис. 2. Различные AdS_5/CFT-соответствия [4]

Для CFT в пространстве-времени Минковского ${}^1\mathbb{R}^d$ вакуумному состоянию теории соответствует $(d+1)$-мерное пространство-время анти-де Ситтера AdS_{d+1}, которое может быть описано метрикой (в форме Пуанкаре):

$$ds^2 = \frac{R^2}{z^2}(-dz^2 + \eta_{ik}dx^i dx^k). \tag{7}$$

Конформной границей пространства-времени анти-де Ситтера является в данном случае пространство-время Минковского (см. рис. 1, 2).

Представленное пространство-время анти-де Ситтера с метрикой (7) является фоновым максимально симметричным пространством-временем с отрицательной постоянной кривизной R. Пространственная геометрия является (гиперболическим) пространством Лобачевского H^d. Пространство-время имеет границу при $z = 0$, которая находится на бесконечном собственном расстоянии от любой точки пространства, но которой световые лучи могут достигать и возвращаться за конечное время [4].

За счет перехода к конформной метрике можно рассмотреть пространство-время AdS_{d+1} с метрикой

$$d\bar{s}^2 = \left(\frac{1+r^2}{2}\right)^2 dt^2 - \sum_{\alpha=1}^{d} d\xi^{\alpha^2},$$

$$r = \sqrt{\sum_{\alpha=1}^{d} \xi^{\alpha^2}} < 1.$$

Конформная граница имеет в данном случае топологию $\mathbb{R}\times S^d$, а внутри сферы S^d пространство имеет геометрию Лобачевского H^d [25, с. 637]. Поэтому пространство как балк, где живут струны, – это шар, а граница – сфера (см. рис. 3).

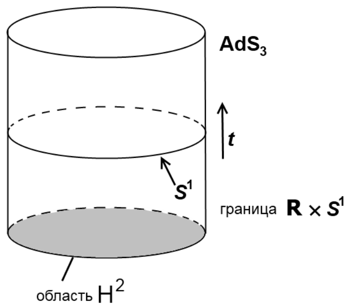

Рис. 3. Конформный вид AdS_3 [25].

Покажем, каким образом в рассуждениях Малдасены появилась метрика анти-де Ситтера для балка на примере перехода от 4-мерной конформной теории поля к суперструнам в 5-мерном пространстве-времени AdS_5.

Следуя Малдасене [26,27], проведем следующее простое рассуждение. Допустим, у нас есть 4-мерная конформная теория поля CFT_4. Например, максимально суперсимметричная теория SYM (супер Янга-Миллса). Эта теория обладает группой конформных симметрий $SO(2,4)$, которая, в частности, содержит в качестве подгруппы $4D$ группу Пуанкаре. Поэтому, если теперь мы хотим найти дуальную теорию струн в неком 5-мерном (на одно пространственное измерение больше, следуя идее голографии, или точнее – по той простой причине, что в четырех измерениях теория струн имеет конформную аномалию, а введение компенсирующего поля Лиувилля может интерпретироваться как дополнительное измерение) пространстве-времени, то метрика в нем должна уважать в первую очередь эту самую $4D$ Пуанкаре-симметрию. Репараметризацией пятой координаты z можно записать ее как

$$ds^2 = \omega(z)(-dz^2 + \eta_{mn}dx^m dx^n).$$

Наконец, эта метрика должна уважать симметрию скейлинга, тоже являющуюся подгруппой четырехмерной конформной группы: $x \to \lambda x$. Тогда получаем наличие преобразования $z \to \lambda z$, и с необходимостью $\omega(z) = R^2/z^2$. В результате получаем метрику AdS_5 в координатах Пуанкаре:

$$ds^2 = \frac{R^2}{z^2}(-dz^2 + \eta_{mn}dx^m dx^n).$$

Таким образом, мы получили метрику пространства-времени анти-де Ситтера в форме (7).

Более общие возбужденные состояния CFT двойственны различным геометриям, которые приближаются к фоновой геометрии при $z \to 0$. Эти более общие геометрии, порождаемые CFT на границе $z = 0$, описываются посредством метрики

$$ds^2 = \frac{R^2}{z^2}(-dz^2 + \Gamma_{ik}dx^i dx^k), \tag{8}$$

где для малых z

$$\Gamma_{\alpha\beta}(x,z) = \eta_{ik} + O(z^d).$$

6.2. Голографический принцип в AdS_{d+1}/CFT-соответствии

В AdS_{d+1}/CFT-соответствии воплощен *голографический принцип*. Действительно, гравитационная теория описывается замкнутыми струнами, распространяющимися в некоторой области пространства-времени размерности $d+1$, называемой *балком*, в то время как физически эквивалентная калибровочная теория определяется на d-мерной *границе* этого пространства-времени. Иначе говоря, явления, действия на границе проявляются в каких-то формах в балке (см. рис. 2). То, что есть в балке, *закодировано* в полях (частицах), живущих на границе, имеющей **меньшую** размерность и которая не видна (находится на бесконечном расстоянии) для тех, кто обитает в балке.

6.3. Фундаментальность пространства-времени в гипотезе AdS/CFT-соответствия

«Если мы хотим говорить о *возникновении* пространства-времени в философском смысле, то это должно быть лишь в том случае, когда устная пространственно-временная физика превосходит устную непространственно-временную физику. Другими словами, мы должны обнаружить, что геометрия пространства-времени (и, возможно, топология и другие структуры) не являются частью некоторой «глубокой теории», но возникают как новые следствия, скажем, когда имеется много степеней свободы (в этом случае пространство-время – это *коллективное явление*) или очень сильные взаимодействия, действующие в более глубокой теории. Более слабый вариант *возникновения* пространства-времени заключается в том, что один *вид* геометрии пространства-времени имеет приоритет над другим типом геометрии или структуры пространства-времени.

Стандартное утверждение в кругах AdS/CFT (см., например, Seiberg (2006)) состоит в том, что возникающая структура – это пространство с гравитацией (связанной с теорией струн, которая сама по себе подразумевает, что струны также являются эмерджентными: см. Горовиц и Полчински (2009, с. 178)). Основная теория, из которой возникает пространство, гравитация (и струны), является локальной 4-мерной квантовой теорией поля. Ясно, что смысл, возникающее здесь пространства, соответствует упомянутому более слабому варианту возникновения: теория со своим собственным пространством (здесь плоское $4D$ пространство Минковского, хотя и с конформной симметрией) и теория более высокого измерения, содержащая гравитацию (и поэтому имеет общую ковариантность) на фоне AdS рассматриваются таким образом, что локальная CFT обеспечивает голографическую проекцию теории высшего измерения: квантовая гравитация выводится из калибровки теории поля. (Примечательно, что временная координата сохраняется в AdS/CFT-дуальности, и не всплывает так, как пространственная геометрия)» [28].

Слабый вариант «возникновения», как видим, предполагает наличие подложки.

7. Голографическое пространство-время: пространство-время из запутанности

Если CFT является «голографическим», т. е. если существует теория дуальной гравитации, то каждое квантовое состояние CFT связано с некоторым состоянием этой дуальной теории, как показано на рис. 2. Другими словами, состояния квантовой системы в 4-мерном пространстве-времени Минковского кодируют всю информацию о состоянии гравитационной системы в лоренцевом 5-мерном многообразии Анти-де-Ситтера AdS_5.

Ван Раамсдонк [4, 29] обратился к квантовой теории информации и выявил, что геометрия пространства-времени в балке напрямую связана с запутанностью структур на границе, лежащих в основе квантово-механических степеней свободы, и что аспекты динамики пространства-времени (гравитации) можно понять, обращаясь к основным квантово-информационным теоретическим положениям.

Таким образом, пространство-время AdS и все в нём возникает как голограмма из информации, хранящейся в запутанных квантовых состояниях (частиц) на границе B.

Рассмотрим одиночное CFT на S^d. Начнем с вакуумного состояния поля, двойственного гравитации в чистом глобальном пространстве-времени AdS_{d+1}. Посмотрим, что происходит с геометрией в AdS_{d+1}, когда мы постепенно меняем состояние поля. Делим границу на две части, которые мы обозначаем A и C. Поскольку CFT является локальной квантовой теорией поля, существуют определенные степени свободы связаны с конкретными пространственными областями. Поэтому мы можем разложить гильбертово пространство полной системы $\mathcal{H} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_C$. Простой количественной мерой запутанности между A и C является энтропия запутанности, определенная как энтропия фон Неймана:

$$S(A) = -Tr(\rho_A \log \rho_A)$$

с редуцированной матрицей плотности для подсистемы A относительно C:

$$\rho_A = Tr_C(|\Psi\rangle\langle\Psi|).$$

Это мера дает нам удобный способ выявить (измерить) насколько тесно запутана данная волновая функция полной системы $|\Psi\rangle$, разделенной на две подсистемы A и C.

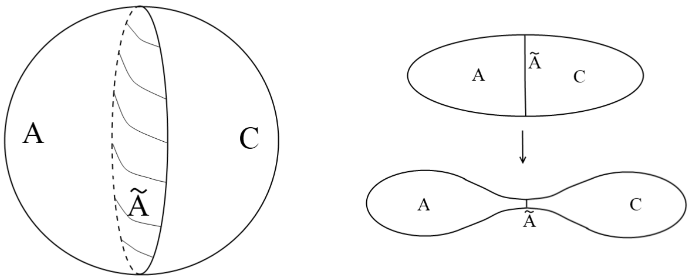

Рис. 4. Влияние на геометрию уменьшения запутанности между голографическими степенями свободы, соответствующими A и C: чем слабее запутанность частей A и C границы, тем хуже части пространства-времени связаны в единое целое [29]

Пусть $\tilde{A}$ – минимальная поверхность, разделяющая A и C в дуальном пространстве-времени анти-де Ситтера AdS_{d+1}. Запутанность подсистем A и C в пространстве-времени Минковского на границе B радикальным образом сказывается на дуальной геометрии в балке.

Убедимся в этом. Для этого используем следующую формулу Риу-Такаянаги:

$$S(A) = \frac{\text{Площадь в балке}(\tilde{A})}{4G_N^{d+2}},$$

где G_N^{d+2} – $(d+2)$-мерная константа Ньютона [31].

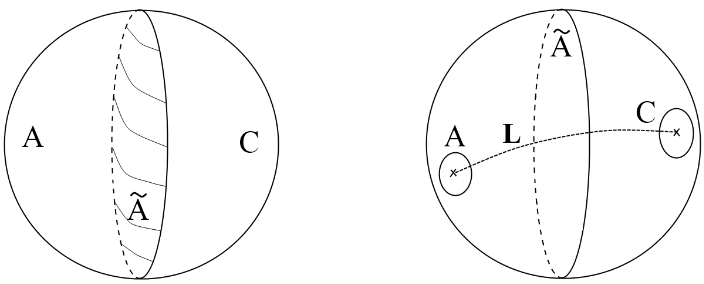

Рис. 5. Длина L геодезической (пунктирная линия), соединяющей граничные точки в A и C, стремится к бесконечности, если взаимная информация между A и C уменьшается до нуля [29].

Получаем следующую картину. Если запутанность между степенями свободы в области A и в области C (и, следовательно, взаимная информация $I(A, C)$) падает до нуля, то площадь (объем) области $\tilde{A}$, разделяющая соответствующие пространственные области A и C в балке, уменьшается (рис. 4). Причем пространство-время, скорее всего, перестанет иметь полностью геометрическое описание, прежде, чем запутанность станет строго нулевой [29].

Более того, длина кратчайшего пространственного пути между точками $x_A \in A$ и $x_C \in C$ в балке стремиться к бесконечности (рис. 5).

Таким образом, грубо говоря, при ослаблении запутанности две области пространства-времени «раздвигаются» и отрываются друг от друга, как показано на рис. 4. Следовательно, метрическая структура в пространстве разрушается – оно распадается на несвязные элементы подложки, или на «атомы пространства». Пространство-время исчезает.

Таким образом, можно сказать, используя образную речь, что запутанность – это клей для пространства-времени, она склеивает «атомы пространства» в одно единое целое.

Сам Ван Раамсдонк высказался более радикально:

> Весь трехмерный мир – это всего лишь иллюзия, информация, закодированная на двумерной поверхности.
>
> Удивительно, что внутренне квантовое явление запутанности, по-видимому, имеет решающее значение для возникновения классического пространства-времени [29].

Квантовое кодирование – это состояния кубитов, из которых строится память квантового компьютера. Фактически это цифры 0 и 1, представляемые некоторым физическим квантовым устройством. Поэтому цифровой код на границе – это квантовая информация, в соответствии с которой возникают дуальные объекты в балке.

Хироши Оогури изобразил описанную ситуацию в виде следующего рисунка, представленного на рис. 6.

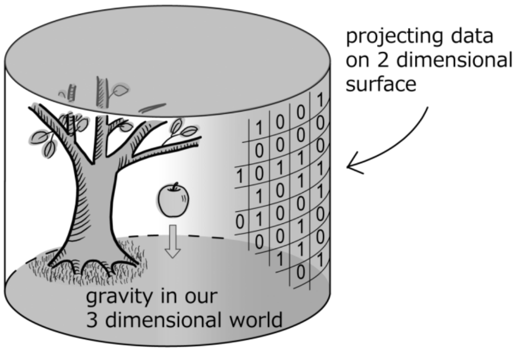

Рис. 6. Сцепленности частей A и C – это квантовая информация. Информация на границе порождает само пространство, *оно склеивается* из «атомов пространства». Нет информации – нет пространства (рис. Хироши Оогури)

8. Пространство-время в петлевой квантовой гравитации

Пространство-время в петлевой квантовой гравитации описывается близко к тому, что делается в геометродинамике Уилера, но вместо канонической пары $(h_{\alpha\beta}, K_{\alpha\beta})$ рассматривается пара Аштекара $(A_\beta^{(\alpha)}, \widetilde{E}_\beta^{(\alpha)})$.

Петлевая квантовая гравитация (LQG) строится по схеме квантовой геометродинамики Уилера-ДеВитта [11, гл. 15].

Фундаментально в LQG пространство. Области пространства в LQG квантуются. Получают *спиновую сеть*. Пространство-время – это развитие пространства, т. е. спиновой сети во времени. Образуется *спиновая пена*.

Одно из важных достижений LQG – это нахождение аналитических решений аналога функционального уравнения Уилера-ДеВитта, которое в этой теории имеет вид:

$$\varepsilon^{(\alpha\beta\gamma)}F_{\mu\nu(\gamma)}\frac{\delta}{\delta A_\mu^{(\alpha)}}\frac{\delta}{\delta A_\nu^{(\beta)}}\Psi[A]=0, \tag{9}$$

где A – линейная связность в пространстве.

Решением этого уравнения является волновая функция, максимум амплитуды которой дает наиболее вероятную связность, а, точнее, наиболее вероятную 3-геометрию со связностью, и, следовательно, показывает как меняется вектор в 3-пространстве M^3, обносимый по петле.

8.1. Переменные Аштекара

Метрику пространства-времени $M^4 = M^3 \times \mathbb{R}$ подвергаем (3+1)-разбиению:

$$g_{ik}=\begin{pmatrix} N^2 & N_\alpha \\ N_\alpha & h_{\alpha\beta}\end{pmatrix}$$

Вводим триаду – три вектора $e_\beta^{(\alpha)}$, где (α) – номер вектора, такие, что

$$h_{\alpha\beta}=\delta_{(\gamma\delta)}e_\alpha^{(\gamma)}e_\beta^{(\delta)}, \qquad h^{\alpha\beta}=\delta^{(\gamma\delta)}e^\alpha_{(\gamma)}e^\beta_{(\delta)}.$$

Состояния в петлевой квантовой гравитации – это решения уравнения Уилера-ДеВитта, но записанные в новых переменных: поля $\widetilde{E}_\beta^{(\alpha)}, A_\beta^{(\alpha)}$.

Опишем эти поля. Поле

$$\widetilde{E}_\beta^{(\alpha)}=\sqrt{h}e_\beta^{(\alpha)},$$

$$h=det(h_{\alpha\beta})=[det(e_\beta^{(\alpha)})]^2=e^2, \quad det(\widetilde{E})=\sqrt{h}\cdot det(e)=h,$$

$$\delta^{(\mu\nu)}\widetilde{E}^\alpha_{(\mu)}\widetilde{E}^\beta_{(\nu)}=hh^{\alpha\beta}.$$

Второе поле задается как

$$A_\beta^{(\alpha)}=\Gamma_\beta^{(\alpha)}+\gamma K_\beta^{(\alpha)},$$

где $\gamma\neq 0\in\mathbb{C}$ – параметр Иммирци, и $\Gamma_\beta^{(\alpha)}$ – так называемая спиновая связность, которая является решением структурного уравнения Картана

$$\partial_{[\beta}e_{\delta]}^{(\alpha)}+\varepsilon^{(\alpha)}_{(\mu\nu)}\Gamma^{(\mu)}_{[\beta}e^{(\nu)}_{\delta]}=0,$$

и имеет вид

$$\Gamma_\beta^{(\alpha)}=-\frac{1}{2}\varepsilon^{(\alpha\gamma)}{}_{(\kappa)}e^\delta_{(\gamma)}[\partial_{[\beta}e^{(\kappa)}_{\delta]}+\delta^{(\kappa\lambda)}\delta_{(\mu\sigma)}e^\nu_{(\lambda)}e^{(\mu)}_\beta\partial_\delta e^{(\sigma)}_\nu],$$

$$K_\beta^{(\alpha)}=\frac{1}{\sqrt{h}}K_{\beta\gamma}\widetilde{E}^\gamma_{(\mu)}\delta^{(\alpha\mu)}=K_{\beta\gamma}e^\gamma_{(\mu)}\delta^{(\alpha\mu)},$$

где $K_{\beta\gamma}$ – внешняя кривизна 3-пространства M^3.

Имеем гамильтонову связь [32]

$$H=\frac{G\gamma^2}{2\sqrt{h}}\varepsilon^{(\alpha\beta\gamma)}\widetilde{E}^\mu_{(\alpha)}\widetilde{E}^\nu_{(\beta)}\left[F_{\mu\nu(\gamma)}-\frac{1+\gamma^2}{\gamma^2}\varepsilon_{(\gamma\alpha\beta)}(A_\mu^{(\alpha)}-\Gamma_\mu^{(\alpha)})(A_\nu^{(\beta)}-\Gamma_\nu^{(\beta)})\right]=0,$$

$$F^{(\alpha)}_{\mu\nu}=\partial_\mu A^{(\alpha)}_\nu-\partial_\nu A^{(\alpha)}_\mu+\varepsilon^{(\alpha\beta\gamma)}A_{\mu(\beta)}A_{\nu(\gamma)}.$$

8.2. Квантованность пространства: дискретность площади и объема

Как известно, площадь 2-мерной поверхности $S \subset M^3$ вычисляется по формуле:

$$A(S) = \iint\limits_S \sqrt{q} du^1 du^2 =$$

$$= \iint\limits_S \sqrt{h}|n| du^1 du^2 = \iint\limits_S \sqrt{n_\alpha h h^{\alpha\beta} n_\beta} du^1 du^2 = \iint\limits_S \sqrt{n_\alpha \widetilde{E}^\alpha_{(\nu)} n_\beta \widetilde{E}^{(\nu)\beta} du^1 du^2}, \quad (10)$$

где

$$q = det||q_{ab}||, \quad q_{ab} = h_{\alpha\beta} \frac{\partial x^\alpha}{\partial u^a} \frac{\partial x^\beta}{\partial u^b}, \quad a, b = 1, 2$$

– индуцированная метрика поверхности $S : x^\alpha = x^\alpha(u^1, u^2)$, u^1, u^2 – координаты на S,

$n = (n^\alpha)$ – нормаль к поверхности S, $|n|^2 = h^{\alpha\beta} n_\beta n_\beta$.

При квантовании мы в этой формуле меняем $\widetilde{E}^\alpha_{(\nu)}$ на оператор $\widehat{E}^\mu_{(\alpha)}$. Следовательно, оператором становится площадь, т. е.

$$A(S) \to \widehat{A}(S),$$

спектр которого, как показали исследования, является дискретным, а собственные значения имеют вид:

$$a(S) = 8\pi G\gamma\hbar c^{-3} \sum_i \sqrt{j_i(j_i + 1)}. \quad (11)$$

Аналогичный результат получается и для объема $V(B)$ области $B \subset M^3$ [35, p. 33]:

$$V(B) = \iiint\limits_B \sqrt{h} d^3x = \iiint\limits_B \sqrt{\frac{1}{6} |\varepsilon_{\alpha\beta\gamma} \widetilde{E}^\alpha_{(\mu)} \widetilde{E}^\beta_{(\nu)} \widetilde{E}^\gamma_{(\sigma)} \varepsilon^{(\mu\nu\sigma)}|} d^3x.$$

а также для длины [36, p. 55].

8.3. Спиновые сети и спиновая пена

Квантовые (дискретные) состояния объёма и площади изображают в виде графа следующим образом.

Область пространства – объём – изображают как точку (узел). Объем примыкающий к данному – также есть точка, а общую между ними часть поверхности изображают как отрезок. Например куб изображается как точка. Из неё исходят шесть отрезков, каждый из которых изображает одну из граней куба (рис. 7). Рядом с точкой указывают величину объёма, а рядом с отрезками – величины площади соответствующих граней. Если объёмы – это любые комбинации различных многогранников, то объёмные полиэдры становятся точками или узлами, а плоские грани – отрезками, линиями, соединяющими узлы.

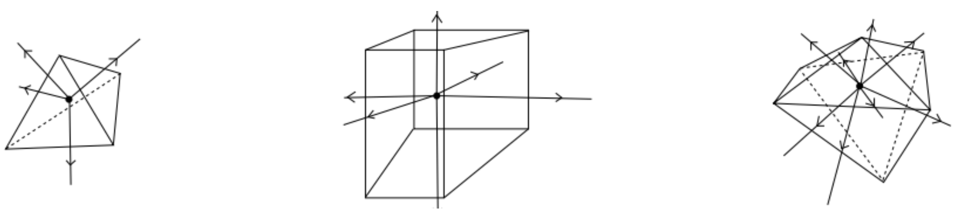

Рис. 7. Объёмы как узлы и отрезки как грани

Как видим, при таком подходе получается то, что математики называют *графом.* Этот граф представляет квантованные объёмы с квантованными площадями, общими для объёмов. Этот граф называют *спиновой сетью.*

Отрезки и точки, или иначе – линии и узлы, образующие граф, – это и есть 3-мерное пространство, геометрия которого определяется тем, как они соединяются.

Спектр оператора площади (ассоциированного с каждым ребром I графа) оказывается дискретным:

$$A_I = 8\pi\gamma G c^{-3}\hbar j_I(j_I + 1)$$

Равно дискретным является спектр оператора объёма, ассоциированного с каждым узлом графа.

При квантовом взгляде на геометрию пространства мы должны говорить о ее квантовых состояниях, которыми являются спиновые сети. Каждой спиновой сети S_i приписывается амплитуда вероятности c_i. Поэтому квантовое состояния геометрии пространства есть суперпозиция спиновых сетей $\sum_i c_i S_i$.

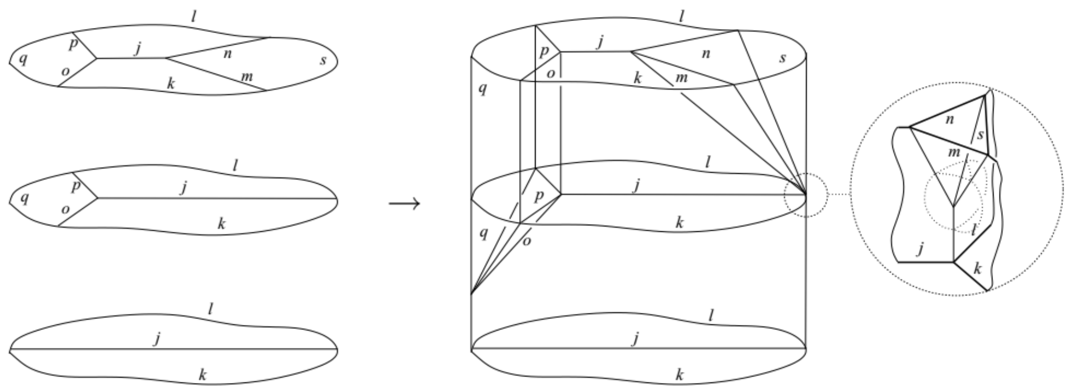

Рис. 8. Спиновая пена: переходы от одной спиновой сети к другой. Узлы превращаются в линии, а линии в грани [33].

Если взять спиновую сеть и рассмотреть её с течением времени, то линии спиновой сети расширяются и становятся двумерными поверхностями, а узлы растягиваются в линии. Это *спиновая пена* (рис. 8). Пространство-время – это спиновая пена. Поперечный срез спиновой пены представляет собой спиновую сеть.

Переходы (шаги), при которых происходит изменение спиновой сети, представятся узлами, в которых сходятся/выходят линии пены. На каждом шаге происходит изменение связности графа, представляющего спиновую сеть.

Точные выражения для вычисления квантовой вероятности шагов спиновой сети вывел Томас Тиманн (Thomas Thiemann).

8.4. Пространство-время в LQG

«Пространство-время в петлевой квантовой гравитации есть квантовая суперпозиция спиновых пен. Спиновая пена является 2-мерный комплексом, срезы которого представляют собой спиновые сети (рис. 9).

Модель спиновой пены определяет как рассчитать амплитуду вероятности для любой такой спиновой пены – обычно как произведение амплитуд вершин, амплитуды ребер, амплитуд граней и т. д. Вопрос: можем ли мы найти модель спиновой пены, поведение которой в течение длительного масштаба времени, большего по сравнению с масштабами Планка, сводится к общей теории относительности?» [33]. Если это удастся, то с помощью теории петлевой квантовой гравитации можно будет описывать макроявления.

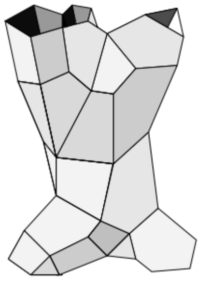

Рис. 9. Спиновая пена как 2-мерный комплекс [34].

Заключение

Представленный обзор далеко не полным образом освещает различные теории пространства-времени. Мы ничего не сказали о фрактальном пространстве-времени, о вероятностном пространстве-времени, о сетевом пространстве-времени Вольфрама [37] и других.

Различные взгляды на пространство-время возникли при решении конкретных задач. Думается, что все эти пространства-времена являются своеобразными сторонам *универсального пространства-времени* U, в котором мы живем и которое является голографическим проявлением запутанных сознаний всех исторических эпох (поколений) [39]. Быть может, по аналогии со стадийным взглядами в интуиционистском пространстве-времени, эти различные стороны U_α универсального пространства-времени U проявятся при рассмотрении морфизмов $f_\alpha : U \to U_\alpha$ в некоторой категории $\mathcal{U}$? Но сегодня нет ответа на этот вопрос.

Список литературы

1. Minkowski H. Die Grundlangen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern // Nachr. König. Ges. Wiss. Göttingen, math.-phys. Kl. 1907. P. 53–111.

2. Мак-Витти Г.К. Общая теория относительности и космология. М.: Издательство иностранной литературы, 1961. 284 с.

3. Гуц А.К. Квантовое рождение физической реальности и математическое описание осознания // Математические структуры и моделирование. 2007. Вып. 17. С. 47–52.

4. Van Raamsdonk M. Lectures on Gravity and Entanglement. `http://arXiv:1609.00026v1`.

5. Фридман А.А. Мир как пространство и время. М./ Ижевск: РХД, 2001.

6. Weyl H. Raum, Zeit, Materie. Berlin, 1923.

7. Минковский Г. Пространство и время / В кн.: Принцип относительности. М.: Атомиздат, 1979.

8. Гуц А.К. Хроногеометрия: Аксиоматическая теория относительности / Изд. 2, испр. и доп. М.: УРСС, 2018. 352 с.

9. Мостепаненко А.М. Пространство и время в макро-, мега- и микромире. М.: Политиздат, 1974. 240 с.

10. Moerdijk I., Reyes G.E. Models for Smooth Infinitesimal Analysis. – Springer-Verlag, 1991.

11. Гуц А.К. Физика реальности. Омск: изд-во ОмГУ, 2012. 424 с.

12. Snyder H.S. Quantized Space-Time // Phys. Rev. 1947. V. 71. № 1. P. 38–41.

13. Kober M. Canonical Quantum Gravity on Noncommutative Spacetime. `https://arxiv.org/abs/1409.1751v3`.

14. Yang H.S. Emergent Spacetime: Reality or Illusion? `https://arxiv.org/abs/1504.00464v1`.

15. Yang H.S. Quantization of emergent gravity // Int. J. Mod. Phys. 2015. A 30. P. 1550016. `http:arXiv:1312.0580`.

16. Seiberg N. Emergent Spacetime. `http://rXiv:hep-th/0601234v1`.

17. Seiberg N. (2006). Emergent spacetime. In D. Gross, M. Henneaux, and A. Sevrin (eds.) / The quantum structure of space and time. World Scientific, 2007. P. 163–178.

18. Дейкгрофф Р. Конец пространства и времени. https://www.youtube.com/watch?v=-B0PIWml9uw.

19. Castro P., Gatta M., Croca J.R., Moreira R. Spacetime as an Emergent Phenomenon: A Possible Way to Explain Entanglement and the Tunnel Effect // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2018. V. 6. P. 2107–2118. http://www.scirp.org/journal/jamp.

20. Visser M. Emergent rainbow spacetimes: Two pedagogical examples. https://arxiv.org/pdf/0712.0810v2.pdf.

21. Barceló C., Visser M., Liberati S. Einstein gravity as an emergent phenomenon? https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0106002.pdf/

22. Vistarini T. Holographic space and time: Emergent in what sense? // Studies in History and Philosophy of Modern Physics. 2017. 59. P. 126–135.

23. Maldacena J. The large Nlimit of superconformal field theories and supergravity // Advances in Theoretical and Mathematical Physics. 1998. V. 2. P. 231–252.

24. Smolin L. The trouble with physics: the rise of string theory, the fall of a science, and what comes next. Boston: Houghton Mifflin, 2006.

25. Цвибах Б. Начальный курс теории струн. М.: Едиториал УРСС, 2001. 784 с.

26. Maldacena J. TASI 2003 lectures on AdS/CFT. https://arxiv.org/abs/hep-th/0309246v5.

27. Парпалак Р. AdS/CFT соответствие. https://susy.written.ru/2011/03/18/AdS-CFT.

28. Rickles D. AdS/CFT Duality and the Emergence of Spacetime // Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics. 2013. V. 44 (3). P. 312–320.

29. Van Raamsdonk M. Building up spacetime with quantum entanglemen. https://arxiv.org/pdf/1005.3035v1.pdf.

30. Van Raamsdonk M. Lectures on Gravity and Entanglement. https://arxiv.org/abs/1609.00026v1.

31. Ryu S., Takayanagi T. Holographic Derivation of Entanglement Entropy from AdS/CFT. https://arxiv.org/abs/hep-th/0603001v2.

32. Casares P.A.M. An review on Loop Quantum Gravity. https://arXiv:1808.01252v1.

33. Baez J.C. Loop Quantum Gravity, Quantum Geometry and Spin Foams. Dublin, 2004.

34. Perez A. Spin Foam Models for Quantum Gravity. https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0301113v2.pdf.

35. Perez A. Introduction to loop quantum gravity and spin foams. https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0409061v3.pdf.

36. Loop quantum gravity: the frst 30 yearsthe frst 30 years / Eds: A. Ashtekar, J. Pullin. World Scientifc Publishing Co. Pte. Ltd., 2017.

37. Wolfram S. A New Kind of Science. Wolfram Media, Inc., 2002. 1280 p.

38. Horowitz G., Polchinski J. Gauge/gravity duality / In D. Oriti (ed.). Approaches to Quantum Gravity: Toward a New Understanding of Space, Time, and Matter (169–186). Cambridge University Press, 2009.

39. Гуц А.К. Альтернативная новая космогония // Математические структуры и моделирование. 2018. №3 (47). С. 15–26

References

1. Minkowski H. Die Grundlangen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. *Nachr. König. Ges. Wiss. Göttingen, math.-phys. Kl.*, 1907, pp. 53–111.

2. McVitti G.C. *General relativity and cosmology.* London: Chapman and Hall Ltd., 1956. Translated under the title *Obschaya teoriya otnositel'nosti i kosmologiya.* Moscow: Izdatel'stvo inostannoy literaturi, 1961, 284 p.

3. Guts A.K. Quantum creation of physical reality and deescription of perception. *Matematicheskie strukturi i modelirovanie*, 2007, no. 17, pp. 47–52.

4. Van Raamsdonk M. Lectures on Gravity and Entanglement. http://arXiv:1609.00026v1.

5. Fridman A.A. *World as space and time.* Moscow/ Izhevsk: RChD Publ., 2001. (in Russian)

6. Weyl H. Raum, Zeit, Materie. Berlin, 1923.

7. Minkowsky G. *Space and time* / In: Princip otnositel'nosti. Moscow: Atomizdat Publ., 1979. (in Russian)

8. Guts A.K. *Chronogeometry. Axiomatic theore of relativity.* Moscow: URSS Publ., 2018, 352 p. (in Russian)

9. Mostepanenko A.M. *Space and time in macro-, mega- and microworld.* Moscow: Politiadat Publ., 1974. 240 p. (in Russian)

10. Moerdijk I., Reyes G.E. *Models for Smooth Infinitesimal Analysis.* Springer-Verlag, 1991.

11. Guts A.K. *Physics od reality.* Omsk: Omsu Publ., 2012. 424 p. (in Russian)

12. Snyder H.S. Quantized Space-Time. *Phys. Rev.*, 1947, vol. 71, no. 1, pp. 38–41.

13. Kober M. Canonical Quantum Gravity on Noncommutative Spacetime. `https://arxiv.org/abs/1409.1751v3.`

14. Yang H.S. Emergent Spacetime: Reality or Illusion? `https://arxiv.org/abs/1504.00464v1.`

15. Yang H.S. Quantization of emergent gravity. *Int. J. Mod. Phys.*, 2015, A 30, pp. 1550016. `http:arXiv:1312.0580.`

16. Seiberg N. Emergent Spacetime. `http://rXiv:hep-th/0601234v1.`

17. Seiberg N. Emergent spacetime, In: D. Gross, M. Henneaux, and A. Sevrin (eds.) *The quantum structure of space and time.* World Scientific, 2007, pp. 163–178.

18. Deikgroff R. End of space and time. `https://www.youtube.com/watch?v=-B0PIWml9uw.`

19. Castro P., Gatta M., Croca J.R., Moreira R. Spacetime as an Emergent Phenomenon: A Possible Way to Explain Entanglement and the Tunnel Effect. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2018, vol. 6, pp. 2107–2118. `http://www.scirp.org/journal/jamp.`

20. Visser M. Emergent rainbow spacetimes: Two pedagogical examples. `https://arxiv.org/pdf/0712.0810v2.pdf.`

21. Barceló C., Visser M., Liberati S. Einstein gravity as an emergent phenomenon? `https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0106002.pdf/`

22. Vistarini T. Holographic space and time: Emergent in what sense? In: *History and Philosophy of Modern Physics*, 2017. vol. 59, pp. 126–135.

23. Maldacena J. The large Nlimit of superconformal field theories and supergravity. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 1998, vol. 2, pp. 231–252.

24. Smolin L. *The trouble with physics: the rise of string theory, the fall of a science, and what comes next.* Boston: Houghton Mifflin, 2006.

25. Zwiebach B. *A first course in string theory.* Cambridge University Press, 2009. Translated under the title *Nachal'niy kurs teorii strun.* Moscow: Editorial URSS Publ., 2011, 784 p.

26. Maldacena J. TASI 2003 lectures on AdS/CFT. `https://arxiv.org/abs/hep-th/0309246v5.`

27. Parpalak R. AdS/CFT-duality. `https://susy.written.ru/2011/03/18/AdS-CFT.`

28. Rickles D. AdS/CFT Duality and the Emergence of Spacetime. *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2013, vol. 44 (3). pp. 312–320.

29. Van Raamsdonk M. Building up spacetime with quantum entanglemen. `https://arxiv.org/pdf/1005.3035v1.pdf.`

30. Van Raamsdonk M. Lectures on Gravity and Entanglement. `https://arxiv.org/abs/1609.00026v1.`

31. Ryu S., Takayanagi T. Holographic Derivation of Entanglement Entropy from AdS/CFT. `https://arxiv.org/abs/hep-th/0603001v2.`

32. Casares P.A.M. An review on Loop Quantum Gravity. `https://arXiv:1808.01252v1.`

33. Baez J.C. *Loop Quantum Gravity, Quantum Geometry and Spin Foams.* Dublin, 2004.

34. Perez A. Spin Foam Models for Quantum Gravity. `https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0301113v2.pdf.`

35. Perez A. Introduction to loop quantum gravity and spin foams. `https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0409061v3.pdf.`

36. *Loop quantum gravity: the frst 30 yearsthe frst 30 years* / Eds: A. Ashtekar, J. Pullin, World Scientifc Publishing Co. Pte. Ltd., 2017.

37. Wolfram S. *A New Kind of Science.* Wolfram Media, Inc., 2002. 1280 p.

38. Horowitz G., Polchinski J. Gauge/gravity duality, In: *D. Oriti (ed.). Approaches to Quantum Gravity: Toward a New Understanding of Space, Time, and Matter (169–186).* Cambridge: University Press, 2009.

39. Guts A.K. Alternative new cosmogony. *Matematicheskie strukturi i modelirovanie.* 2018, no. 3 (47), pp. 15–26

Авторы

Гуц Александр Константинович, д. ф.-м. н., профессор, кафедра кибернетики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, пр. Мира, 55а, г. Омск, 644077, Россия.
E-mail: guts@omsu.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Гуц А. К. Теории пространства-времени // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2019. № 4. С. 23—47.

Authors

Guts Alexander Konstantinovich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dostoevsky Omsk State University, Mira str., 55-a, Omsk, 644077, Russia.
E-mail: guts@omsu.ru

Please cite this article in English as:
Guts A. K. The theories of spacetime. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2019, no. 4, pp. 23–47.