DOI: 10.22363/2224-7580-2025-1-98-106
EDN: XYWOUM

ПРИНЦИП МАХА И МЕТАРЕЛЯЦИОННАЯ ТРАКТОВКА МЕТРИКИ

А.Б. Молчанов*

Физический факультет
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2

Аннотация. Одной из главных задач метареляционного подхода к описанию пространства-времени и физических взаимодействий является вывод пространственно-временных величин из более фундаментальных законов, описывающих самые базовые физические процессы в микромире. К таким процессам, в частности, относятся акты испускания и поглощения электромагнитного излучения элементарными частицами. Ранее было показано, что статистический учёт всех возможных актов электромагнитных взаимодействий в системе частиц, имеющих дискретные спектры атомов водорода, приводит к возможности определения шкал расстояний и времени в такой системе. Этот результат сопоставлялся с наличием сопутствующих и собственных координат в космологии, а также приводил к выражению для масштабного фактора, связывающего эти системы. В данной работе проводится обобщение этого результата: показывается, что функция распределения конфигураций излучателей и поглотителей имеет связь с метрикой в классической теории гравитации, демонстрируется ключевая роль расширенного (сильного) принципа Маха.

Ключевые слова: пространство-время, метафизический подход, теория гравитации, квантовая теория статистический подход

Введение

Реляционный подход к построению теории, способной описывать пространство-время и физические взаимодействия, подразумевает следующие аспекты. Все пространственно-временные понятия считаются вторичными по отношению к характеристикам фундаментальных взаимодействий и элементарных частиц. Описание взаимодействий следует воспринимать в рамках концепции дальнодействия. На фундаментальном уровне это приводит к отсутствию различий между локальными и глобальными свойствами вселенной, что выражается расширенным принципом Маха [1]. При построении фундаментальной теории необходимо полностью отказаться от любых феноменологических конструкций, которые могли бы быть положены в её основу, а работать только с математическими абстракциями. Следует считать, что подобные абстракции удовлетворяют некоторым простейшим

* E-mail: alexeybm2009@gmail.com

(метафизическим) принципам, позволяющим формулировать на их основе математические законы, которые описывают наиболее фундаментальные физические процессы. Такой подход к созданию содержательной теории называется метареляционным [2], а математический аппарат, который выстраивается при движении по этому пути, представляет собой теорию бинарных систем комплексных отношений (БСКО).

Существующие и наиболее хорошо разработанные теории в рамках геометрического и теоретико-полевого подходов, претендовавшие на звание наиболее фундаментальных, к текущему моменту времени накопили ряд проблем. Самой существенной из них является невозможность совмещения принципов общей теории относительности (ОТО) и квантовой теории. Поэтому всё больше физиков-теоретиков склоняются к тому, что должна существовать некоторая более фундаментальная теория, из которой бы следовали как квантовые хррактеристики элементарных частиц и их взаимодействий, так и классические пространственно-временные понятия. Сегодня известны несколько попыток реализации подобной теории, привлекших к себе большое внимание научной общественности.

Так, например, в теории петлевой квантовой гравитации (ПКГ), разрабатываемой в группах Ли Смолина и Карло Ровелли [3], предлагается положить в основу математическую конструкцию, названную спиновой сетью. Это граф, рёбрам которого сопоставляются целые или полуцелые числа, соответствующие неприводимым представлениям группы SU(2), а вершинам – операторы, названные интертвинерами («переплётчиками») и составляемые комбинаторно так, чтобы сохранялся полный угловой момент. Такой формализм был предложен Роджером Пенроузом в 1971 году [4] и, вероятно, имел общие корни с его теорией твисторов, которая изначально была нацелена на вывод характеристик классической геометрии из более фундаментальных свойств спиноров, однако, как заявлял сам Пенроуз, теория твисторов не смогла достичь этой цели. Спиновая сеть Пенроуза тоже не решала эту задачу в полной мере, она давала возможность получать углы, но не позволяла описывать длины. В рамках ПКГ эта модель была расширена: граф спиновой сети стал основой графа триангуляции классического пространства (или пространства-времени в случае так называемой «спиновой пены»), разбивая его на элементарные ячейки с дискретными значениями площадей и объёмов. При этом объёмы соответствовали вершинам, а площади – рёбрам и выражались через соответствующие целые и полуцелые числа. На такой сети оказалось возможным определить дискретный аналог связности через параллельный перенос векторов вдоль петель графа, что позволило прийти к дискретному аналогу метрики. Однако перейти к классическому пределу пока так и не удалось. Кроме того, время, используемое для описания динамики спиновой сети, считается априорно заданным.

Другой теорией, которая на первый взгляд исключает названную проблему времени в ПКГ, является причинная динамическая триангуляция (ПДТ), предложенная Ринэйтом Лоллом в начале 2000-х [5]. В этой теории полагается, что пространство-время дискретно и состоит из элементарных симплексов, имеющих планковские размеры. Граф триангуляции строится по рёбрам и вершинам симплексов. Такой подход позволяет регуляризовать фейнмановские интегралы и получить ОТО как классический предел. Тем не менее в этой теории, в отличие от ПКГ, отсутствует связь свойств графа триангуляции со свойствами элементарных частиц, в итоге на фундаментальный вопрос о том, что представляют собой метрика и длины, эта теория ответ не даёт.

Следует упомянуть и подход Стивена Вольфрама, который предложил рассматривать всю фундаментальную физику как продукт эволюции гиперграфа, заданного некоторым набором простых правил, подобно тому, как небольшое число простых локальных правил приводит к сложному поведению клеточного автомата [6]. В этом подходе, оформленном Вольфрамом к концу 2010-х, элементарные частицы могут проявляться как устойчивые системы рёбер и вершин гиперграфа, расстояния и промежутки времени могут быть связаны с числами шагов между вершинами. Этот подход пока не может конкурировать с той же ПКГ, поскольку обладает слишком высоким уровнем абстракции и предоставляет слишком широкий класс возможностей для описания фундаментальных физических процессов, так что до сих пор отсутствует конкретная реализация, которая бы позволила описать реальный мир.

Названные теории, хотя и являются по своему духу реляционными, всё же содержат в своих основах феноменологические сущности, из которых предлагается вывести некий прообраз метрики на масштабах порядка планковских, а затем перейти от него к классическому пределу. В такой ситуации гравитация остаётся в числе фундаментальных взаимодействий и считается, вероятно, даже более фундаментальной, чем остальные. Трудности, с которыми столкнулись названные теории, даже привели к идее постквантовой теории классической гравитации, предложенной британским физиком-теоретиком Джонатаном Оппенгеймом в 2018 году [7]. В этой теории предполагается, что гравитация является классической на фундаментальном уровне, хотя пространство-время уже не выступает фоном для других полей (как, например, в квантовой теории поля в искривлённом пространстве-времени), а активно взаимодействует с ними. Это приводит к нарушению унитарности квантовых полей, а также к тому, что классическая метрика начинает «шуметь» под воздействием квантовых эффектов. Эта шумовая компонента возникает как статистический итог по квантовым состояниям рассматриваемых систем. Несмотря на то, что теория Оппенгейма по своему построению не является реляционной, последний названный аспект вполне удовлетворяет реляционным принципам.

Известна ещё одна попытка построения теории, где уже вся гравитация понимается как некоторый статистический результат. Она была предпринята Эриком Верлинде в 2011 году [8]. В его теории энтропийной гравитации последняя исключается из числа фундаментальных взаимодействий и появляется как эффект, препятствующий уменьшению энтропии в физической системе. Теория Верлинде пока не обобщена на квантовые эффекты, и на её основе удаётся получить только ньютоновскую гравитацию. Однако работы в направлении такого обобщения ведутся.

Становится ясно, что интерес современных физиков-теоретиков, решивших не отдавать предпочтение теории струн и традиционным попыткам квантования гравитации, сосредоточился вокруг идеи вывода пространственно-временных понятий и самой гравитации из некоторых более фундаментальных сущностей. Если взять лучшие идеи из названных выше теорий и попытаться их совместить в наиболее радикальном варианте, то вырисовывается следующая картина. Гравитация не обязана входить в число фундаментальных взаимодействий, а все пространственно-временные понятия и характеристики гравитационного взаимодействия должны получаться из свойств элементарных частиц и трёх оставшихся фундаментальных взаимодействий при статистическом учёте всей их совокупности в рассматриваемой системе. Этот путь предвосхищается идеей П.К. Рашевского, приведённой в конце его монографии «Риманова геометрия и тензорный анализ» [9]: «Возможно, что и сам четырёхмерный пространственно-временной континуум с его геометрическими свойствами окажется в конечном счёте образованием, имеющим статистический характер и возникающим на основе большого числа простейших физических взаимодействий элементарных частиц».

В рамках метареляционного подхода удаётся встать на этот путь и сделать первые шаги. Ранее уже было показано, что теория БСКО ранга (3,3) описывает двухкомпонентные спиноры, из элементов которых можно построить четырёхмерные векторы с сигнатурой пространства-времени Минковского [1]. Идея вывода понятия длины также была продемонстрирована [10]. В настоящей работе эта идея обобщается на одномерный прообраз метрики. Напомним основные положения.

Появление координат в метареляционном подходе

Рассмотрим систему, состоящую из частиц, которые могут испускать и поглощать электромагнитное излучение в определённых спектрах. Под излучением, которое испущено, но не поглощено, подразумевается всё возможное излучение различных энергий, способное быть испущенным и принятым частицами системы.

Выберем одну из частиц и поставим задачу вычислить амплитуду поглощаемого ею излучения (всех возможных типов) от остальных частиц системы. Для этого необходимо для каждой пары излучатель–поглотитель учесть вклады излучений всех энергий спектра, на которых возможно поглощение. В случае непрерывного спектра суммирование заменяется интегрированием.

В классической физике, когда мы знаем парные расстояния между поглотителем и другими частицами, а также промежутки времени между всеми актами излучения и поглощения, мы вычисляем по ним разности фаз и пользуемся принципом Гюйгенса для того, чтобы определить каждое слагаемое в сумме или вид подынтегрального выражения. В случае непрерывного спектра и одинаковой амплитуды излучения амплитуда поглощения частицей a от излучателя b будет пропорциональна интегралу

$$f_{ab} \sim \int e^{ik_\mu (x_a^\mu - x_b^\mu)} d^4k \equiv 2\pi\delta\left(x_a^\mu - x_b^\mu\right),$$

то есть будет максимальной пока и поскольку для каждой энергии остаются неизменными координаты поглотителя в базисе излучателя $x_{ab}^\mu \equiv x_a^\mu - x_b^\mu$.

В метареляционном подходе решается обратная задача: координаты неизвестны, их необходимо найти, зная, что искомые числа должны быть одними и теми же для всех энергий, а амплитуда поглощения при этом должна иметь максимум. Принцип Гюйгенса возникает в теории БСКО минимального ранга (2,2), и в его выражение входит фазовый множитель (фазовое отношение) в виде $e^{i\Delta\phi_{ab}}$, являющийся априорно заданным (в отличие от априорно заданных координат в классической физике). Поскольку БСКО ранга (2,2) является подсистемой БСКО всех других более высоких рангов, в том числе и ранга (3,3), описывающей элементарные акты испускания и поглощения электромагнитного излучения, то фазовый множитель должен содержать в себе характеристики этого излучения, а именно компоненты изотропного вектора. Поскольку фаза является вещественным числом, то необходимо ввести ещё один вектор и взять скалярное произведение. Компоненты нового вектора будут прообразами координат в базисе излучателя.

Однако координатами в классическом смысле они не будут, поскольку для одной пары частиц результат не будет однозначным, так как фаза определена с точностью до целого числа n периодов 2π. На этом этапе необходимо вспомнить, что аналогичная ситуация имеет место для любой пары частиц в системе. А поскольку для каждой частицы заданы фазовые отношения ко всем остальным частицам, то сами фазы (и, в частности, числа n) должны быть согласованы между собой так, чтобы их парные разности соответствовали заданным. Здесь тоже может остаться неоднозначность: может существовать несколько вариантов согласования фаз (несколько наборов чисел n и значений от 0 до 2π). Это приведёт к нескольким вариантам определения координат из фазовых множителей. Поэтому необходимо будет брать статистику по таким конфигурациям и смотреть, какая из них после подстановки разностей фаз в принцип Гюйгенса даст максимальную амплитуду поглощения для соответствующей пары частиц. Таким образом удастся определить координаты в классическом смысле.

Описанная процедура называется «декомпактификацией» расстояний. Она была рассмотрена на простой модели системы из нескольких атомов водорода в работе [11].

Шкалы расстояний

Для простоты можно рассмотреть описанную процедуру в одном измерении. Можно взять суперпозицию всех фазовых вкладов и задаться целью найти пары частиц a и b, расстояния r_{ab} между которыми, получаемые из фаз

φ_{ab}, принимают одно и то же значение для всех энергий спектра. Результирующая амплитуда при этом должна иметь максимум.

При решении этой задачи можно посчитать количество конфигураций всех состояний частиц в системе, реализующих искомое парное расстояние r_{ab} (точнее говоря, заданный малый интервал от r_{ab} до $r_{ab} + \delta r$, далее мы будем понимать расстояние именно в таком смысле). Может так оказаться, что для каких-то расстояний r'_{ab} конфигураций окажется меньше, а для каких-то других r''_{ab} – больше. То есть r''_{ab} будет статистически более значимым, чем r'_{ab}, распределение числа конфигураций по значениям расстояний будет неравномерным, следовательно, шкала таких расстояний тоже будет неравномерной. В предыдущих работах было показано, что при подсчёте всех конфигураций, реализующих разные значения r_{ab}, получается равномерное распределение. Однако также было показано, что распределение будет неравномерным, если считать конфигурации, реализующие разные r_{ab} и некоторое фиксированное Δr_{bc}. Такую ситуацию при $r_{ab} \gg \Delta r_{bc}$ естественно интерпретировать как наблюдение частицей a с расстояния r_{ab} пары других частиц b и c, взаимодействующих друг с другом на расстоянии Δr_{bc}. Первый вариант, в котором подсчёт конфигураций выполняется только для r_{ab}, соответствует шкале сопутствующих расстояний. Второй вариант будет соответствовать шкале собственных расстояний, если определить её масштабный отрезок следующим образом:

$$\Delta r_* = \frac{1}{N_0} \Delta r n(r),$$

где индексы частиц опущены, $n(r)$ – функция распределения числа конфигураций в зависимости от r, а N_0 – константа нормировки. При этом расстояние по новой шкале будет определяться как

$$r_* = \frac{1}{N_0} \sum_i \Delta r n_i \to \frac{1}{N_0} \int_0^r n(r) dr,$$

где n_i – число конфигураций в интервале от r_i до r_{i+1}, а сумма ведётся по конечному числу интервалов.

Расстояние r_* естественно интерпретировать как собственное, поскольку оно имеет смысл для конкретной частицы-наблюдателя и определяется суммой отрезков сопутствующих расстояний $\Delta r \ll r$, а статистическая сумма $\frac{1}{N_0} \sum_i n_i$ по сути является масштабным фактором. Это соответствует определению собственного расстояния, принятого в классической космологии [12].

Метареляционная трактовка метрики

Можно построить и более общую интерпретацию, поскольку приведённые рассуждения справедливы не только для космологии, но и для систем лабораторных размеров. Обратим внимание на то, что расстояние r по первой шкале определяется для каждой пары частиц и зависит только от числа конфигураций. Оно будет инвариантным относительно допустимых координатных преобразований. Расстояние r_* по второй шкале зависит от расстояния по первой и уже не будет обладать такой инвариантностью. Рассмотрим запись квадрата интервала в геометрическом подходе:

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x_\mu, x_\nu)dx^\mu dx^\nu$$

и одномерный аналог этой формулы для простоты рассуждений (с сохранением общекоординатной инвариантности):

$$ds = g(x)dx.$$

Здесь задана система координат с осью X и метрика $g(x)$. Пусть A – некоторая точка, имеющая координату a на этой оси. Величина

$$\int_0^a dx \equiv a$$

есть расстояние между вещественными числами 0 и a на числовой прямой. Ему ставится в соответствие расстояние вдоль оси X между точкой, принятой за начало отсчёта, и рассматриваемой точкой A в физическом пространстве. Расстояние, определённое таким образом, следует считать собственным для наблюдателя, помещённого в начало отсчёта. Это расстояние изменится, если перейти к другим координатам. Оно соответствует r_* в реляционном подходе. Если же наблюдатель окажется удалённым и от точки A, и от начала отсчёта, то расстояние между этими точками, найденное по координатной оси, не будет иметь для него физического смысла, поскольку значение $g(x)$ в точке, где находится наблюдатель, может отличаться и от $g(0)$, и от $g(a)$. Так что удалённому наблюдателю нужно знать метрику, чтобы правильно вычислить расстояние

$$s = \int_0^a ds = \int_0^a g(x)dx.$$

Расстояние, определённое таким образом, следует считать сопутствующим для точки A и начала отсчёта. Оно не зависит от выбора координат, поскольку смена x на x' «компенсируется» изменением $g(x)$ на $g'(x')$ так, чтобы соблюдалась инвариантность.

При сопоставлении формул

$$\mathrm{s} = \int g(x)dx \text{ и } x = \int n(s)ds$$

можно прийти к выводу, что в метареляционном подходе метрика $g(x)$ должна быть определена как обратная функция к $n(s)$ с учётом нормировки. То есть в системе большого числа электромагнитно взаимодействующих частиц метрика определяется функцией распределения конфигураций, реализующих те или иные расстояния между каждой парой частиц. Отдельно подчеркнём, что поскольку каждая конфигурация задаётся состояниями всех частиц системы, то значение $g(x)$ для любой пробной частицы определяется всей остальной системой. Это полностью соответствует принятой в метареляционной парадигме расширенной формулировке принципа Маха.

Обсуждение и выводы

Главной особенностью полученного в данной работе результата является демонстрация того, что в системе большого числа излучателей и поглотителей, имеющих спектры атомов водорода, существует метрика, определяемая на основе статистического учёта всех возможных актов электромагнитных взаимодействий. Метрика в таком случае является обратной функцией к плотности распределения конфигураций, реализующих разные расстояния r_{ab} при фиксированном r_{bc}.

Следует отметить, что, хотя приведённые рассуждения оказываются справедливы для одного измерения, пока не вполне ясно, как правильно обобщить их на 3+1 измерений. Самая очевидная трудность состоит в том, что в формулу для квадрата интервала дифференциалы собственных расстояний входят квадратично и независимо по разным осям; функция g является тензорной, в то время как $n(s)$ – по-прежнему скаляр. Вероятно, нужно обобщать саму процедуру вывода собственных расстояний в метареляционном подходе на 3+1 измерения. Но при этом следует учитывать, что расстояние – скалярная величина по определению. Тогда на каком этапе следует ожидать возникновения тензорных величин?

Эти и некоторые другие вопросы являются предметом дальнейших исследований. На текущий момент метареляционный подход уже проявляет себя в лучшем свете при построении теории, в которой гравитация и классические пространственно-временные представления должны получаться как статистический результат более фундаментальных факторов. Ни одна из современных теорий, нацеленных на решение этой задачи, пока не может продемонстрировать сходных по значимости успехов.

Литература

1. *Владимиров Ю. С.* Реляционная картина мира. Кн. 1: Реляционная концепция геометрии и классической физики. Москва : ЛЕНАНД, 2021. 224 с.
2. *Владимиров Ю. С.* Метафизические основания физики : обоснование метареляционной парадигмы. Москва : ЛЕНАНД, 2024. 240 с.
3. *Rovelli C., Smolin L.* Loop space representation of quantum general relativity // Nuclear Physics B. 1990. Vol. 331, no. 1. P. 80–152.
4. *Penrose R.* Angular momentum: an approach to combinatorial space-time // Quantum Theory and Beyond / ed. by T. Bastin. Cambridge University Press, 1971. P. 151–180.
5. *Ambjørn J., Jurkiewicz J., Loll R.* Reconstructing the universe // Physical Review D. 2005. No. 72 (6). 064014.
6. *Wolfram S.* A New Kind of Science. Wolfram Media, 2002.
7. *Oppenheim J.* A post-quantum theory of classical gravity? arXiv preprint arXiv:1811.03116. 2018.
8. *Verlinde E.P.* On the origin of gravity and the laws of Newton // Journal of High Energy Physics. 2011. Vol. 4. P. 29.
9. *Рашевский П. К.* Риманова геометрия и тензорный анализ. Москва : Наука, 1967. С. 658.
10. *Molchanov A. B.* Cosmological Scale Factor In The Relational Approach // Metafizika (Metaphysics). 2023. No. 2. P. 38–48.

11. *Молчанов А. Б.* Процедура декомпактификации расстояний // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2023. № 2. С. 36–46.

12. *Вайнберг С.* Гравитация и космология : принципы и приложения общей теории относительности / пер. с англ. В. М. Дубровика и Э. А. Тагирова ; под ред. Я. А. Смородинского. Москва : Мир, 1975. С. 442.

MACH'S PRINCIPLE AND METARELATIVE INTERPRETATION OF THE METRIC

A.B. Molchanov*

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
2 bldg, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

Abstract. One of the main tasks of the metarelational approach to the description of space-time and physical interactions is the derivation of space-time quantities from more fundamental laws describing the most basic physical processes in the microworld. Such processes, in particular, include acts of emission and absorption of electromagnetic radiation by elementary particles. It was previously shown that statistical accounting of all possible acts of electromagnetic interactions in a system of particles with discrete spectra of hydrogen atoms leads to the possibility of determining the scales of distances and time in such a system. This result was compared with the presence of accompanying and proper coordinates in cosmology, and also led to an expression for the scale factor linking these systems. In this paper, this result is generalized: it is shown that the distribution function of emitter and absorber configurations is related to the metric in the classical theory of gravity, and the key role of the extended (strong) Mach principle is demonstrated.

Keywords: space-time, metaphysical approach, gravity theory, quantum theory statistical approach

* E-mail: alexeybm2009@gmail.com