

## ОНТОЛОГИЯ ПЕТЛЕВОЙ КВАНТОВОЙ ГРАВИТАЦИИ. ПЕТЛИ

В.Д. Эрекаев<sup>1</sup>

*Философский факультет*

*Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова  
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские Горы*

**Аннотация.** Рассматриваются некоторые онтологические аспекты теории петлевой квантовой гравитации. Прежде всего, обсуждается возможная природа одного из фундаментальных объектов теории – квантовой петли. В частности, кратко рассматриваются возможные материальная, геометрическая и инструменталистская интерпретации этого объекта.

**Ключевые слова:** онтология, квантовая гравитация, квантовые петли

### Основания петлевой квантовой гравитации

Уже почти столетие как теоретическая физика пытается построить теорию квантовой гравитации. Все предложенные варианты оказались неудовлетворительными. В настоящее время существует много подходов<sup>2</sup>, однако можно выделить два, которые рассматриваются в качестве наиболее перспективных. Это – теория струн и теория петлевой квантовой гравитации (ТПКГ). Если по теории струн в нашей стране существует определенная литература, то петлевая квантовая гравитация почти не обсуждается. Между тем это очень любопытная теория, имеющая свои плюсы и минусы. Сторонники петлевой квантовой гравитации добились больших успехов в развитии своей теории, хотя, возможно, их подход с физической точки зрения недостаточно определен и кардинален для решения фундаментальных проблем квантования тяготения [1]. ТПКГ – очень абстрактная теория, поэтому представляет интерес обсудить некоторые возможные ее интерпретации. В первую очередь нас будут интересовать онтологические аспекты этой теории, прежде всего, какие в ТПКГ имеются физические объекты и каковы формы их сосуществования.

Создателями «петлевой квантовой теории гравитации» (80-е гг. XX в.) являются Ли Смолин, А. Аштекар, Т. Джекобсон и К. Ровелли. В теории петлевой квантовой гравитации теория относительности сохраняется, по существу, нетронутой, изменяется только процедура ее применения совместно с квантовой механикой.

---

<sup>1</sup> E-mail: erekaev@mail.ru

<sup>2</sup> Причинная динамическая триангуляция, некоммутативная геометрия, евклидова квантовая гравитация и др.

Ли Смолин считает, что руководящим принципом создания петлевой теории квантовой гравитации было следующее: «Главная объединяющая идея проста для постановки: *не стартовать с пространства или с чего-либо, движущегося в пространстве*. Стартовать с чего-либо, что является чисто квантово-механическим и имеет, вместо пространства, некоторый вид чисто квантовой структуры» [2. С. 240]. Это очень радикальная методологическая установка для естественнонаучного познания: исключить пространство из природного бытия – смелый шаг. Любопытна решимость «стартовать с чего-либо» (все равно с чего, добавим мы), лишь бы *оно* было квантово-механическое и вне пространства. Но что предлагается вместо пространства? Чистая квантовая структура. В качестве абстрактной модели и конструкции – это вполне допустимо. Но может ли структура существовать вне пространства? В современной философии структуру рассматривают также в качестве философской категории, то есть в качестве понятия, имеющего всеобщий, фундаментальный и необходимый статус природного бытия. Но может ли «целостная совокупность связей...», то есть структура, заменить пространство? Быть еще одной категорией – может, хотя это еще требует исследований, но заменить такую категорию, как пространство, нет.

Существенно, что ТПКГ базируется на двух фундаментальных теориях: квантовой механике и общей теории относительности (ОТО).

С точки зрения К. Ровелли, основными идеями петлевой квантовой гравитации являются следующие:

- 1) квантовая механика и ОТО;
- 2) независимость от фона.

Любопытно, что к этим двум идеям он добавляет еще две, которые рассматривает также в качестве определяющих, но которые фактически можно считать отрицательными:

- 3) отсутствие объединения взаимодействий;
- 4) четырехмерное пространство-время (то есть отсутствие пространства большей размерности) и отсутствие суперсимметрии [3. С. 15–16].

Прежде всего, отметим бросающуюся в глаза непоследовательность создателей теории: стартовать с чего-либо без пространства и в то же время фактически постулировать 4-мерность пространства-времени. Последнее – просто необходимо, поскольку ТПКГ базируется на ОТО, которая, являясь фоново независимой, тем не менее, опирается на 4-мерное пространство-время. Но фоновонезависимость ОТО не означает, что в этой теории нет пространства: по существу, оно определяет всю теорию. Свойство фоновонезависимости, используемое в ОТО, означает, что масса и энергия лишь искривляют пространство-время, но не создают или уничтожают его. Пространство всегда есть в обеих теориях относительности.

Можно сказать, что концептуально-методологически ТПКГ продолжает идеологию Дирака, который осуществил синтез квантовой механики и СТО. ТПКГ осуществляет синтез квантовой механики и ОТО, не привлекая дополнительных гипотез о многомерии или суперсимметрии. Как уже отмечалось, нас будет интересовать онтология этой теории, то есть формы существования объектности, присутствующие в ней.

Можно выделить следующие фундаментальные для этой теории объекты:

- 1) квантовые петли;
- 2) планковские объемы;
- 3) планковские площади;
- 4) графы;
- 5) спиновые сети;
- 6) спиновая пена.

Первые три объекта являются основополагающими образующими теории. Из них в теории формируются все другие структуры. Графы представляют собой важное инструментальное средство, построенное из планковских объемов и планковских площадей, которое в некоторой степени аналогично диаграммам Фейнмана. Спиновые сети и спиновая пена являются еще более сложными конструкциями. Как можно понять авторов этой теории, они в определенном смысле являются не только инструментальным, но и концептуально значимым средством, претендующим на онтологический статус в этой теории. Спиновые сети и спиновая пена – конструкции, построенные на базе первых четырех фундаментальных объектов теории. Возможные онтологические аспекты графов, спиновых сетей и спиновой пены будут обсуждаться в следующей статье.

### Онтология квантовых петель

В 1986 г. А. Аштекар с помощью оригинального выбора переменных сумел получить относительно простую полиномиальную структуру уравнений для квантования теории Эйнштейна. Петли – это произвольные замкнутые линии в пространстве, по которым можно осуществить параллельный перенос спинора. Согласно Ли Смолину, сам «термин “петлевая” был введен из-за того, что в некоторых вычислениях использовались маленькие петли, выделенные в пространстве-времени» [2. С. 249]. Вообще говоря, термин, который используется только лишь «в некоторых вычислениях», явно не дотягивает до статуса фундаментальности. Тем не менее понятие «петель», действительно, играет определяющую роль в этом варианте теории квантовой гравитации.

В петлевом подходе на 3-поверхности вычерчивается замкнутая петля, которая нужна для того, чтобы обеспечить параллельный перенос спинора вокруг этой петли. «Когда мы возвращаемся в исходную точку, то обнаруживаем, что имело место линейное преобразование спинового пространства  $S$ » [2. С. 780]. След комплексной матрицы этого преобразования «представляет собой комплексное число, не зависящее от базиса, так что это есть просто свойство спиновой связности  $\Gamma$ , соответствующей выбору петли» [4. С. 780]. Другими словами, след матрицы преобразования определяется соответствующей отдельной петлей. Более общий пример этого предложил К. Вильсон в калибровочной теории. В 1988 г. К. Ровелли, Ли Смолин и Т. Джейкобсон использовали эту идею для общей теории относительности и назвали эти следы, которые зависят от выбора петли, петлевыми переменными для ОТО. Если взять эти петлевые переменные в качестве квантовых операторов, то

«базисные состояния», семейство которых позволяет обеспечить общую ковариантность в квантовой гравитации, будут их собственными состояниями.

Однако подобная процедура означает, что петля выбирается на гладкой поверхности, поскольку выделить (прочертить) непрерывную петлю можно только в непрерывном пространстве. Петли обладают следующей существенной особенностью: метрика пространства существует только в бесконечно малой области вокруг линии петли, исчезая вне нее. Далее в результате довольно красивых математических манипуляций получается, что пространство становится квантованным. Вопрос состоит в том, как связаны друг с другом петли на непрерывном пространстве и квантованность пространства? На наш взгляд, хороших *физических интерпретаций* этого пока не предложено. Нужно физически ясно описать процедуру перехода от конструирования петель на непрерывном пространстве к появлению дискретного, квантованного пространства в ТПКГ. То есть физически ясно объяснить процесс превращения физического континуального пространства в дискретное.

С точки зрения К. Ровелли петли можно трактовать по-фарадеевски. «Фарадей понимал электромагнитные явления в терминах «силовых линий». В основании этого интуитивного представления лежат две ключевые идеи. Во-первых, подходящие физические величины заполняют пространство; эта догадка Фарадея является основанием теории поля. Во-вторых, подходящие переменные относятся не к тому, что происходит в точке, но, скорее, имеют отношение к связи между различными точками (это близко идеологии реляционности – В.Э.), связанными линией. Математической величиной, которая выражает эту идею, является голономия калибровочного потенциала вдоль линии. В максвелловском случае, например, голономия  $U(A, a)$  вдоль замкнутой линии  $a$  есть просто экспонента от интеграла вдоль  $a$  от трехмерного векторного максвелловского потенциала  $A \dots$ » [3. С. 17–18]. Ключевая идея петлевой квантовой гравитации состоит в описании поля, подобного электромагнитному, непосредственно в терминах линий этого поля. Еще до появления КТПГ было показано, что ОТО можно выразить на языке калибровочных полей. Метрика пространства-времени при этом оказывается подобной электрическому полю. В итоге в рамках такого петлевого полевого подхода квантовая геометрия представляет собой определенный вид графа, а квантовое пространство-время есть последовательность событий, по которым эволюционирует граф через локальные изменения в своей структуре [2. С. 249]. С другой стороны, нельзя представлять петли в 3-мерном пространстве. Само пространство получается из них. Какое же представление адекватно? Каков бы ни был ответ, физика квантовых петель, по-видимому, находит себя в области *расширенной онтологии* [8. С. 93]: это *необъектная* форма существования реальности, к которой, например, относятся такие объективные формы существования, как пространство, время, энергия и др.

Таким образом, согласно сторонникам ТПКГ, ключевая идея петлевой квантовой гравитации состоит в описании поля, подобного электромагнитному, непосредственно в терминах линий этого поля. Казалось бы, отсюда можно сделать вывод о том, что ТПКГ – полевая теория. Но это принципиально не так: в этой теории нет непрерывного пространства-времени, что для полевой теории принципиально важно. Наконец, в этой теории изначально

нет и самого пространства: оно порождается более фундаментальными сущностями – квантовыми петлями. Это – очень радикальный подход.

Можно выделить три способа появления петель в ТПКГ.

1. На 3-поверхности вычерчивается замкнутая кривая, по которой переносится спинор. Далее осуществляется описанная выше процедура.

2. Фарадеевский (полевой) вариант. В отсутствии вещества линии поля замыкаются. На наш взгляд, этот факт очень примечателен. Он представляет собой не чисто теоретическую процедуру, а связан с реальными физическими процессами. Существуют ли более глубокие причины подобного замыкания? Насколько глубоко мы понимаем этот механизм? Почему бозонное поле в отсутствии фермионов замыкается? Не скрываются ли здесь какие-то более глубокие основания?

3. Петли в графах. Графы, которые выражают квантовые состояния ТПКГ, построены из квантовых объемов (фактически планковских ячеек) и квантовых площадей (граней планковских ячеек) и конфигурационно очень сложны. В них вершины могут многократно замыкаться через ребра графа. В каждом графе можно легко обнаружить многочисленные петли, образуемые вершинами и ребрами. Но это уже другие петли. Это – не любые замкнутые кривые в непрерывном пространстве, по которым можно переносить спинор. Они имеют более выраженную дискретную природу. Можно ли называть их квантовыми петлями и что будет представлять собой процедура переноса спинора в этом случае – отдельный вопрос. Однако именно эти петли, на наш взгляд, более естественны для квантованного пространства и для ТПКГ в целом, хотя что такое петля в квантованном пространстве еще требует осмысления. Так как согласно ТПКГ непрерывное пространство создается петлевыми структурами как эмерджентный макроскопический феномен, то существенно отметить, что, прочерчивая замкнутую кривую в непрерывном пространстве, мы автоматически прочерчиваем ее по дискретному, квантованному пространству. Фактически – по планковским ячейкам, «замыкая» их между собой. Кавычки здесь использованы постольку, поскольку в радикальной интерпретации дискретного (квантованного) пространства между планковскими ячейками нет метрики и проводить линии невозможно.

Существенным является вопрос о том, связаны ли друг с другом эти три варианта? То, что петли – это любые произвольные замкнутые линии в пространстве-времени, должно означать, что петли выделяются в *непрерывном* пространстве-времени и явным образом не относятся к *квантованному* пространству-времени. Но в то же время петли *задают квантованность* пространства-времени. Как это совместить? С конструктивистской точки зрения здесь нет проблем. Теоретическое построение квантовой петли можно трактовать следующим образом: выбирается некоторый «затравочный» классический теоретический объект (в данном случае петля, прочерченная в непрерывном пространстве), а затем определенным образом ей сопоставляется оператор. Такой прием является характерным для квантовой теории. Остается разобраться с физической интерпретацией этой процедуры и с порождаемой ею онтологией.

Можно ли придать петлям в ТПКГ определенный онтологический статус? Можно ли, например, говорить о том, что петля – это определенная

форма существования объектности? Можно ли говорить о том, что она объективно существует? Если петля – это произвольно проведенная в пространстве замкнутая кривая, то ее природу можно рассматривать как чисто инструменталистскую: вычерчивание струны в непрерывном пространстве – это удобное инструменталистское средство для осуществления определенных вычислений. В связи с этим, казалось бы, у нее не существует никакого онтологического содержания. Однако в этом вопросе есть две, как говорят физики, лазейки. Первая лазейка заключается в том, что только на самой петле и в  $\delta$ -функциональной близости от нее существует поле. Вне этой области поле исчезает. Вторая связана с тем, что силовые линии свободного поля замыкаются в петли. Это позволяет выдвинуть гипотезу о том, что петли выделяют в пространстве определенные области – топосы. Их можно рассматривать в аристотелевском смысле. В пользу возможности такой трактовки говорит то, что след комплексной матрицы преобразования спинорного пространства после перемещения спинора по петле *не зависит от базиса*. Это есть свойство спиновой связности  $\Gamma$ , соответствующей выбору петли [4. С. 780]. Если рассматривать эти следы, зависящие от выбора петли, названные петлевыми переменными, в качестве квантовых операторов, то «базисные состояния», семейство которых позволяет обеспечить общую ковариантность в квантовой гравитации, будут их собственными состояниями [4. С. 780].

Здесь кроется концептуальная трудность. Казалось бы, естественно, что место в пространстве задается выбором некоторого базиса. По Ньютону: «Место есть часть пространства...» [5. С. 31]. Но в ТПКГ все завязано на квантовые петли. Они задают само пространство. То есть сама петля представляет собой место. Но отдельная петля – еще не пространство. Только их совокупность создает все пространство, то есть совокупность мест образует пространство. И действительно, в ТПКГ петли формируют пространство. Подобный подход согласуется со статусом аристотелевского топоса: место неотделимо от тела. Вместе с тем здесь хорошо просматривается реляционизм. И действительно, тела-топосы в своей совокупности задают пространство. Это означает, что они имеют пространствообразующий статус. Реляционная природа пространства в такой трактовке усиливается еще и тем, что «в физике Аристотеля “место” – это *граница тела, причем не того тела, о месте которого идет речь, а объемлющего его тела*» [6. С. 47]. О различии понимания «места» у Аристотеля и Ньютона см., например, в [6].

Но не исключено, что петли выполняют еще одну онтологическую функцию – формируют особого типа физическую объектность. Это может означать, что спинор как физический объект перемещается вдоль другого физического объекта – петли-топоса. Это квантовое движение по квантовой структуре и задает первоэлементы физического пространства. Таким образом, физическое пространство – это синтез движения и структуры.

Обратим также внимание на любопытную аналогию между петлями и струнами, предложенную, в частности, К. Ровелли: «... между двумя теориями (теорией суперструн и ТПКГ. – В.Э.) существуют несомненные сходства: прежде всего, тот очевидный факт, что обе теории начинают с представления о том, что релевантные возмущения на планковском масштабе представляют

собой одномерные объекты – назовем их петлями или струнами» [7. С. 4]. Это означает, что К. Ровелли онтологически отождествляет петлю и струну. Насколько законно подобное отождествление? Дело в том, что в современной теории струн существуют и другие фундаментальные физические объекты – браны. В том числе и 0-браны, то есть точки, которые также имеют важный физический смысл. В связи с этим теорию струн вполне логично переименовать в *теорию бран*. Струна – это 1-брана. Но тогда, если отождествлены струны и петли как основополагающие объекты теории, было бы естественно рассмотреть по аналогии и петли других размерностей, скажем 2-мерные, 6-мерные и т.д. Какой бы стали ТПКГ и теория струн в этом случае?

### Литература

1. Венециано Г. Миф о начале времен // В мире науки. 2004. URL: [www.sciam.ru/article/2296](http://www.sciam.ru/article/2296) (дата обращения: 11.07.2021).
2. Смолин Л. Неприятности с физикой: взлет теории струн, упадок науки и что за этим следует. London: Penguin Book, 2007 / пер. Ю.А. Артамонова. С. 240. URL: [http://zhurnal.lib.ru/a/artamonow\\_j\\_a/](http://zhurnal.lib.ru/a/artamonow_j_a/) (дата обращения: 11.07.2021).
3. Ровелли К. Квантовая гравитация / пер. А.Д. Панова. URL: <http://dec1.sinp.msu.ru/~panov/Rovelli.pdf> (дата обращения: 11.07.2021). (Rovelli K. Quantum Gravity. Cambridge University Press, 2004. P. 15–16).
4. Пенроуз Р. Путь к реальности, или Законы, управляющие вселенной. М.: R&C Dinamics, 2007. 911 с.
5. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. М., 1989. С. 31.
6. Мамчур Е.А. Понятие пространства в контексте культуры (на материале перехода от аристотелевского пространства к пространству физики Нового времени) // Пространство как трансцендентальная предпосылка познания реальности. М.: ИФ РАН, 2014. С. 46–65.
7. Rovelli C. Loop Quantum Gravity. 1 Oct 1997. P. 4. URL: [arXiv:gr-qc/9710008v1](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9710008v1) (дата обращения: 11.07.2021).
8. Эрекаев В.Д. Проблема физической онтологии // Проблема реальности в современном естествознании. М.: Канон+, 2015. С. 83–107.

## ONTOLOGY OF LOOPED QUANTUM GRAVITY. HINGES

V.D. Erekaev<sup>3</sup>

*Faculty of Philosophy, Lomonosov Moscow State University  
Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation*

**Abstract.** Some ontological aspects of the theory of loop quantum gravity are considered. First of all, its possible nature of one of the fundamental objects of theory – the quantum loop – is discussed. In particular, the possible material, geometric and instrumentalist interpretations of this object are briefly considered.

**Keywords:** ontology, quantum gravity, quantum loops

---

<sup>3</sup> E-mail: [erekaev@mail.ru](mailto:erekaev@mail.ru)