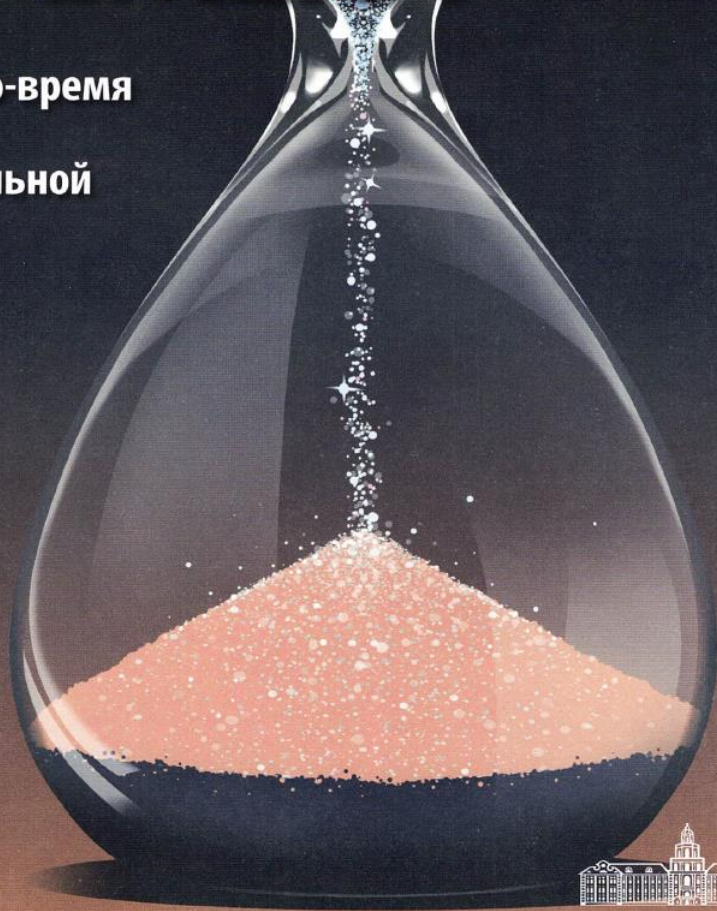


# НАЧАЛО ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Возникло ли  
пространство-время  
из более  
фундаментальной  
реальности?



## Происхождение пространства и времени

Возможно, пространство-время возникает из более фундаментальной реальности. Выяснение того, как это происходит, могло бы помочь достичь самой насущной цели физики — создания теории квантовой гравитации

Адам Беккер

**Натали Пакет (Natalie Paquette) проводит время в размышлениях о том, как "вырастить" дополнительное измерение. Начните с маленьких кружочков, сидящих на каждой точке пространства и времени, — извилистое измерение, замкнутое на себя. Потом сжимайте эти кружочки, все меньше и меньше, затягивая петли, пока не произойдет любопытная трансформация: измерение перестанет казаться крошечным и вместо этого станет огромным. Подобное ощущение схоже с тем, когда вы понимаете, что нечто, казавшееся маленьким и близким, на самом деле огромно и далеко. По словам Пакет, "мы сокращаем пространственное направление, но когда пытаемся уменьшить его до определенной точки, вместо этого появляется новое, большое пространственное направление".**

Пакет, физик-теоретик из Вашингтонского университета, не одинока в размышлениях об этом странном преобразовании измерений. Растущее число физиков, работа которых, несмотря на различие подходов и методов, так или иначе связана с пространством и временем, все больше склоняются к глубокой идее: пространство и, возможно, даже время не фундаментальны. Вместо этого пространство и время могут быть возникающими (эмерджентными). Они возникают из структуры и проявлений более фундаментальных сущностей. В таком представлении глубокомысленные реалисты такие вопросы как "что было до Большого взрыва?" не задают. "В фундаментальном смысле вопроса нет — пространство, как и время, как его понимаем, — не фундаментальное понятие", — говорит Пакет.

Также радикальные идеи проникают из поиска нового в относительности и квантовой механике, ведущей физической теории микромира. Лучшая современная квантовая теория — это общая квантовая теория поля, соединяющая воедино квантовую механику и специальную теорию относительности. Она необходима для всего остального — это квантовая физика, которая удивительно точна, когда дело доходит до свойств материи, энергии и субатомных частиц. Обе теории легко прошли все испытания, которые физики могли разработать за прошедшее столетие. Можно было бы подумать, что если сложить их вместе, то получится "теория всего".

Однако эта идея не очень хорошо сочетается. Спросите общую теорию относительности, что происходит в квантовой физике, и вы получите противоречивые результаты. Общая теория относительности рушится на свободе неукротимых бесконечностей. Природа, как мы знаем, регулирует бесконечности на малых масштабах, аналогично тому, как это делает квантовая механика, но она не знает, что происходит в пределах очень малого или в недрах черных дыр. Мы же, люди, тоже не

знаем, что происходит в этих местах. Частью проблемы является то, что пространство и время ведут себя совершенно по-разному в этих двух теориях, и никакая позиция, объединяющая пространство и время в нечто единое, не смогла бы сделать их совместимыми. Единственной задачей была бы согласовать эти представления о пространстве и времени.\*\*

Один из способов сделать это — устранить проблему в ее источнике, в самом пространстве-времени, заставив пространство и время возникнуть из чего-то более фундаментального. В последние годы несколько различных направлений исследований показали, что на самом глубоком уровне реальности пространство и время существуют не так, как в нашем повседневном мире. В частности, за последние десятилетия эти идеи радикально изменили представление физиков о черных дырах. Теперь исследователи используют эти концепции для объяснения работы чего-то еще более экзотического, например кротовых нор — гипотетических туннелей между удаленными точками пространства-времени. Имеющиеся успехи сохраняют надежду на еще более глубокий прорыв. Если пространство-время эмерджентно, то выяснение того, откуда оно берется (и как оно может возникнуть из чего-либо другого), может оказаться недостающим ключом, который наконец откроет дверь в "теорию всего".

### **Мир в струнном дуэте**

Сегодня среди физиков наиболее популярна теория квантовой гравитации — теория струн. Ее основная идея заключается в том, что струны — фундаментальные составляющие материи и энергии, которые порождают множество фундаментальных субатомных частиц, наблюдаемых на ускорителях частиц по всему миру. Струны ответственны даже за гравитацию. Так, гипотетическая частица "гравитон", переносящая гравитационное взаимодействие, есть неизбежное следствие теории.

Однако теорию струн трудно понять, потому что она обитает в труднодоступных районах изощренной математики, на изучение которой физикам и математикам потребовались десятилетия. Большая часть структуры теории струн все еще не нанесена на карту, многие детали все еще планируются, и карты еще предстоит составить. В этой новой области исследовательской математики — это поиск новых математических двойственностей, устанавливающих неожиданные связи между физическими системами.

Один из примеров двойственности, рассмотренный в начале этой статьи: между теориями, которые на первый взгляд кажутся совершенно разными, могут существовать математические соответствия. Они столь сильны, что если следовать этим математическим соответствиям, две модели одинаковы. Это означает, что можно свободно переходить от одной модели к другой и использовать методы одной

модели, чтобы понять, как работает другая. Пакет говорит: «Если вы внимательно следите за фундаментальными строительными блоками теории, то вы, естественно, можете иногда обнаружить, что ... можно вырастить новое пространственное измерение».

Наличие подобной двойственности наводит многих теоретиков в области теории струн на мысль, что пространство и время могут быть эмерджентными. Идея зародилась в 1997 г., когда Хуан Малдасена (Juan Maldacena) из Института перспективных исследований в Принстоне установил математическую связь между одной квантовой теорией, известной как конформистская теория поля (CFT), и особым видом пространства-времени из общей теории относительности, известным как антидеситтеровское пространство (AdS). Эти две теории кажутся совершенно разными. Действительно, в CFT вообще нет гравитации, а в AdS используется вся теория гравитации Эйнштейна. Тем не менее одна и та же математика может описать обе эти модели. Когда это было обнаружено, так называемое AdS/CFT-соответствие обеспечило перспективную математическую связь между квантовой теорией и целой вселенной с гравитацией в ней.

### **Узнаем ли мы когда-нибудь истинную природу пространства и времени?**

носительности, известным как антидеситтеровское пространство (AdS). Эти две теории кажутся совершенно разными. Действительно, в CFT вообще нет гравитации, а в AdS используется вся теория гравитации Эйнштейна. Тем не менее одна и та же математика может описать обе эти модели. Когда это было обнаружено, так называемое AdS/CFT-соответствие обеспечило перспективную математическую связь между квантовой теорией и целой вселенной с гравитацией в ней.

Любопытно, что антидеситтеровское пространство в концепции AdS/CFT-соответствия имело на одно измерение больше, чем конформистская теория поля. Однако это несоответствие не является дефектом, а скорее желаемой полнотой в уже хорошо изученной математической связи.

Эта идея была позже дополнена такими именами, как Герард 'т Хофт (Gerard 't Hooft) в Утрехтском университете в Нидерландах и Леонард Сасскинд (Leonard Susskind) из Стэнфордского университета, которые высказали мысль, что пространство и время должны быть "голографическими". В голографическом принципе информация о некоторой области пространства-времени кодируется на ее границе.

Другими словами, пространство и время в некотором смысле могут быть всего лишь проекцией на некоторую более фундаментальную реальность, так же как трехмерное

изображение может быть закодировано на двумерной поверхности. Например, информация о событиях, происходящих в четырехмерном пространстве-времени, может быть закодирована на его трехмерной внутренней части. — как голограмма. "Полагаю, многие люди подумали, что мы чокнутые", — комментирует Сасскинд.

Аналогично в **AdS/CFT**-соответствии четырехмерная теория CFT кодирует все, что касается пятимерного пространства AdS, с которым она связана. В этой системе вся область пространства-времени построена из взаимодействий между компонентами квантовой системы в конформистской теории поля. Малдасена сравнивает этот процесс с чтением романа. "Если вы рассказываете историю в книге, в ней есть персонажи, которые что-то делают. Но что там есть, это строка текста, верно? То, что делают персонажи, выводится из этой строки текста. Персонажи в книге были бы похожи на теорию AdS, а сама строка текста — на CFT".

Но откуда берется место в **AdS**-пространстве? Если это пространство возникает, то из чего оно возникает? Ответ заключается в особом и странно квантовом виде взаимодействия в CFT: так называемая запутанность (**или путаница**). Причем, пер., связь на большом расстоянии между объектами мгновенно коррелирующая их поведение статистически невероятными способами. Запутанность, как известно, беспокоила Эйнштейна, который называл это "**жутким действием на расстоянии**".

**\*\***"Несмотря на свою пугающую природу, запутанность тем не менее представляет собой основную особенность квантовой физики. Когда любые два объекта взаимодействуют в квантовой механике, они обычно запутываются и остаются запутанными до тех пор, пока изолированы от остального мира, независимо от того, как далеко друг от друга они могут переместиться. В экспериментах физики поддерживали запутанность между частицами, находящимися на расстоянии более 1 тыс. км друг от друга, и даже между частицами на Земле и другими частицами, отправленными на орбитальные спутники. В принципе, две запутанные частицы могли бы находиться связаны на противоположных сторонах Галактики или даже Вселенной. Тем не менее, для человека такие расстояния не имеют значения для феномена запутанности — вот загадка, которая десятилетиями беспокоит физиков.

Однако если пространство возникает, то способность запутанности сохраняться на больших расстояниях может быть не багом, а фичей, потому что, в конечном счете, расстояние — это конструкция. Согласно исследованиям AdS/CFT-соответствия, которые проводят физики Шинсей Рю (Shinsei Ryu) из Принстонского университета и Тадаши Такаянги (Tadashi Takayanagi) из Киотского университета, запутанность — это то, что в первую очередь создает расстояния в пространстве AdS. Любые две близлежащие области пространства на стороне AdS дуальности соответствуют двум

сильно запутанным квантовым компонентам CFT. Чем больше они запутаны, тем ближе друг к другу области пространства.

В последние годы физики начали предполагать, что это соотношение может быть применимо и в нашей Вселенной. "Что удерживает пространство вместе? Не дает ему распасться на отдельные области?" Ответ заключается в запутанности между двумя частями пространства, — говорит Сасскинд. — "Непрерывность и связность пространства обязаны своему существованию квантово-механической запутанности". Таким образом, запутанность может лежать в основе структуры самого пространства, образуя основу и своего рода систему направляющих, которые поддерживают геометрию мира. "Если бы мы могли каким-то образом разрушить запутанность между двумя частями пространства, пространство развалилось бы. Это привело бы к прямо противоположному результату, нежели воплощение пространства", — объясняет Сасскинд.

Если пространство состоит из запутанности, то загадку квантовой гравитации, по-видимому, решить гораздо проще: вместо того чтобы пытаться объяснить искривление пространства квантовым способом, можно сказать, что само пространство возникает из фундаментального квантового явления. Сасскинд подозревает, что именно по этой теории квантовой гравитации было так трудно найти: "Я думаю, что причина, по которой это никогда хорошо не работало, заключается в том, что люди пытались связать две разных вещей: общей теории относительности и квантовой механики, и сложить их вместе. И я думаю, что это никогда не работало из-за отсутствия связи. Структура может быть дважды квантовой, а затем сворачиваться в нечто классическое".

Однако пространство — это только половина работы. Пространство без времени бесполезно, потому что тогда ничего не могло бы происходить. "Время тоже должно каким-то образом возникать", — говорит Марк ван Раамсдонк (Mark van Raamsdonk), физик из Университета Британской Колумбии."\*\*

**исследователь связей между запутанностью и пространством-временем.** — Это недостаточно изучено и представляет собой активную область исследований".

По словам ван Раамсдонка, еще одна область исследований, которая пользуется повышенным вниманием ученых, — использование моделей эмерджентного пространства-времени для понимания природы кротовых нор. Раньше многие физики полагали, что отправка объектов через кротовую нору невозможна даже теоретически. Однако в последние несколько лет физики, работающие над AdS/CFT-

соответствием и подобными моделями, нашли новые способы построения кротовых нор. "Мы не знаем, смогли бы мы сделать это в нашей Вселенной", — отмечает ван Раамсдонк. — "Но что мы теперь знаем, так это то, что определенные виды проходимых кротовых нор теоретически возможны".

Две научные статьи, одна в 2016 г., другая в 2018 г., привели к продолжающейся активной работе в этой области (по вопросу проходимости кротовых нор существует обширная современная библиография, в том числе российских авторов. — Примеч. пер.). Однако даже если бы можно было сконструировать проходимые кротовые норы, это было бы мало полезно для космических путешествий. "Вы не можете пролететь через эту кротовую нору быстрее, чем потребовалось бы [свету], чтобы пройти долгий путь вокруг", — считает Сасскинд.

### **Пространство для размышлений**

Если специалисты по теории струн правы, то пространство строится из квантовой запутанности, и время может строиться так же. Но что бы это могло означать на самом деле? Как пространство может быть "сделано из" запутанности между объектами, если только эти объекты сами где-то не находятся? Как могут эти объекты запутаться, если они не испытывают влияния времени и не изменяются? Понятие существования вещей как подлинной реальности ставит вопросы, если оно не обитает в истинном пространстве и времени.

Это выводит физиков в плоскость философии, где работают ученые, такие как Кристиан Вютрих (Christian Wüthrich) из Женевского университета. Он занимается философскими проблемами физики и рассуждает: "Как же интуитивно представить себе мир без пространства и времени?" — говорит Вютрих. По его мнению, такой мир "лишен привычной структуры, к которой мы привыкли".

Однако наша интуиция ошибается, она "эволюционировала в африканской саванне, взаимодействуя с макрообъектами, с флорой и фауной", и, как правило, не переносится в мир квантовой механики. Вютрих полагает, что когда дело доходит до квантовой гравитации, то вопросы "Где же тут вещество?" и "Где оно живет?" — это не те, которые следует задавать.

Абсолютно верно, что в повседневной жизни объекты живут в разных местах. Однако, когда мы говорим о квантовом мире, это не означает, что пространство и время должны быть фундаментальными. Но тогда они тоже не являются иллюзорными. Рассмотрим, например, жидкости. "В конечном счете, это элементарные частицы, такие как электроны, протоны и нейтроны, или, что еще более фундаментально, кварки и лептоны", — говорит Вютрих.

Пространство и время, по мнению Вютриха, могли бы работать таким же образом в теории струн и других теориях квантовой гравитации. В частности, пространство-время может возникнуть из материалов, которые мы обычно считаем материей во Вселенной, то есть из самой материи и энергии. "Дело не в том, что сначала мы построим пространство и время, а затем мы добавляем какую-то материю. Скорее что-то материальное должно сначала появиться и создать систему отсчета пространства и времени".

Этот сценарий напоминает нам, что даже в рамках фундаментальной физики пространство и время могли возникнуть изначально. Например, исследования в рамках AdS/CFT-соответствия показывают, что само пространство в этой дуальности возникает как признак квантовой системы. На самом деле это еще более интересный вывод: Алисса Ней (Alyssa Ney) из Калифорнийского университета в Девисе утверждает, что "AdS/CFT дает возможность предоставить руководство по квантовой гравитации" и, возможно, даже указывает на то, что пространство-время возникает, а не является фундаментальным. Нейполагает, что верно и обратное. Другими словами, AdS/CFT-соответствие может означать, что квантовая теория возникает, а пространство-время фундаментально. Либо, наконец, ни то ни другое не фундаментально и существует какая-то еще более глубокая фундаментальная теория. Допущение эмерджентности пространства-времени — это серьезное утверждение, по словам Ней, и оно может оказаться истинным, но "по крайней мере, просто глядя на AdS/CFT, в его еще не видно четких аргументов в пользу этой концепции".

Возможно, более серьезная проблема картины устройства мира в связи с возникающим пространством-временем, рисуемой теорией струн, скрыта на виду, прямо в названии самого соответствия AdS/CFT. "Мы ведь не живем в антидеситтеровском пространстве, — отмечает Сасскинд. — Мы живем в чем-то гораздо более близком к пространству де Ситтера". Пространство де Ситтера описывает ускоряющуюся и расширяющуюся вселенную, очень похожую на нашу собственную. "У нас нет ни малейшего представления о том, как там применяется [голография]", — полагает Сасскинд. Выяснение того, как установить такого рода соответствие для пространства, которое более близко напоминает нашу реальную Вселенную, — одна из главных насущных проблем, стоящих перед теорией струн. "Я думаю, мы сможем лучше понять, как перейти к космологической версии этого", — говорит ван Раамсдонк.

Наконец, имеются новости — точнее, их отсутствие — от новейших ускорителей частиц, не напешших никаких доказательств наличия дополнительных частиц, предсказанных дополнительной суперсимметрией, на идее которой основывается теория струн. Суперсимметрия диктует, что у всех известных частиц будут свои



собственные "суперпартнеры", которые таким образом, удваивают число фундаментальных частиц. Однако Большой адронный коллайдер в CERN, частично нацеленный для поиска "суперпартнеров", не обнаружил никаких признаков их существования. "Все действительно точные версии [эмерджентного пространства] должны согласовываться с наблюдениями, — говорит Алисса Ней. — Как раз поэтому суперсимметрия и теория струн оказываются на ваших глазах".\*\*

### **Атомы пространства-времени**

Теория струн — не единственная наводящая на мысль о возникновении пространства-времени. Теория струн "не оправдала (своих) обещаний как способ объединить гравитацию и квантовую механику", — говорит Абхай Аштекара (Abhay Ashtekar), физик из Университета штата Пенсильвания. "Сила теории струн сейчас заключается в предоставлении чрезвычайно богатого набора двумерных методов, который широко используется в очень многих частях физики". Аштекара — один из основоположников наиболее популярной версии квантовой гравитации, известной как петлевая квантовая гравитация.

В петлевой квантовой гравитации пространство не гладкое и непрерывное, как в общей теории относительности. Вместо этого оно состоит из дискретных компонентов, которые Аштекара называет кусками, или "атомами", пространства-времени.

Эти "атомы" пространства-времени соединены в сеть с одномерными и двумерными поверхностями, которые в совокупности формируют гладкое пространство больших масштабов. Несмотря на ограниченность этой пены всего двумя измерениями, она порождает наши четырех измерения пространства и одно измерение времени.

Сасскинд сравнивает это с одеждой: "Если вы взглянете на свою рубашку, то сразу увидите, что все это одномерные нити. Просто эти нити настолько плотно упакованы, что для всех практических целей вы можете думать о рубашке как о двумерной поверхности. Точно так же пространство-время вокруг нас выглядит как трехмерный континуум. Но на самом деле эти [атомы] пространства-времени пересекаются".

Хотя ранние гипотезы квантовой гравитации предполагают, что пространство-время эмерджентно, то есть оно возникает, но вид эмерджентности в обеих теориях различен. Теория струн предполагает, что пространство (по крайней мере отчасти) создается квантовой запутанностью.

"Подумайте о том, что когда-нибудь мы получим полное квантовое описание пространства", — говорит Аштекара. "Но, скорее всего, это не теория струн". С другой стороны, в петлевой квантовой гравитации пространство-время формируется как

своего рода сеть, напоминая, например, натянутую лесную паутину, которая движется под влиянием песчинок из-за ветра. Гладкое, привычное для нас пространство-время получается в результате коллективного поведения крошечных "зёрен" пространства-времени; как и дюны, зёрна всё ещё остаются песком, хотя массивные кристаллические зёрна не выглядят и не действуют как волнистые дюны.

Несмотря на эти различия, как петлевая квантовая гравитация, так и теория струн предполагают, что пространство-время возникает из некоторой основополагающей реальности. И это не единственные предложенные теории квантовой гравитации, которые указывают в заданном направлении.

Теории квантовых множеств, ещё один претендент на роль квантовой гравитации, утверждают, что пространство и время также состоят из более фундаментальных компонентов. **"Действительно поразительно то, что для большинства правдоподобных теорий квантовой гравитации, которые у нас есть, в некотором смысле идея такова: да, общего релятивистского пространства-времени нет на фундаментальном уровне",** — говорит Нокс.

Учёные чрезвычайно возбуждаются, когда разные теории квантовой гравитации сходятся хотя бы в чём-то.

### **Будущее пространства на краю времени**

Современная физика — жертва собственного успеха. Квантовая физика и общая теория относительности феноменально точны, каждая в своей области применимости. Квантовая гравитация необходима только для описания экстремальных ситуаций, когда огромные массы помещаются в непостижимо крошечные пространства.

Такие условия существуют лишь в нескольких местах в природе. Например, в центре чёрной дыры. Особенно важно, что такие условия реализуются не в физических лабораториях, даже самых больших и мощных. Потребовался бы ускоритель частиц размером с галактику, чтобы непосредственно проверить поведение природы в условиях, где квантовая гравитация.

Это отсутствие прямых экспериментальных данных в значительной степени служит причиной того, что учёные так долго топчутся на месте.

Столкнувшись с ограничением доказательств, учёные ищут обходные пути. Возможно, возникают намёки на новую физику в космологических наблюдениях или в понимании того, что произошло во время большого взрыва или в центре чёрных дыр — вот где, в конечном счёте, лежат перспективы.

Отсюда подходит той знаменитой фразе "Я думаю, что наш лучший выбор [для теории квантовой гравитации] — это космология", — говорит Малдасена (по словам Я.Б. Зельдовича, космос — это ускоритель бедного человека. — Примеч. пер.).

Может быть, что-то в космологии, что мы сейчас считаем непредсказуемым, что, вероятно, можно предсказать, как только мы поймём полную теорию, или что-то новое, о чём мы даже не думали.

Однако лабораторные эксперименты могут пригодиться для проверки теории струн, по крайней мере косвенно.

Учёные надеются изучить AdS/CFT-соответствие в лабораторных экспериментах, используя системы, которые можно сильно загнать в квантовый режим. В лабораториях уже можно моделировать аналог гравитации, например в сверхтекучих жидкостях или в некоторых квантовых материалах.

Возможно, когда-нибудь мы действительно обнаружим новые эксперименты, которые дадут нам новые тесты пространства-времени и гравитации. Такие эксперименты могут "иметь некоторые особенности гравитации, хотя, возможно, и не все особенности", — говорит Малдасена. — "Это также зависит от того, что именно вы называете гравитацией".

Узнаем ли мы когда-нибудь истинную природу пространства и времени?

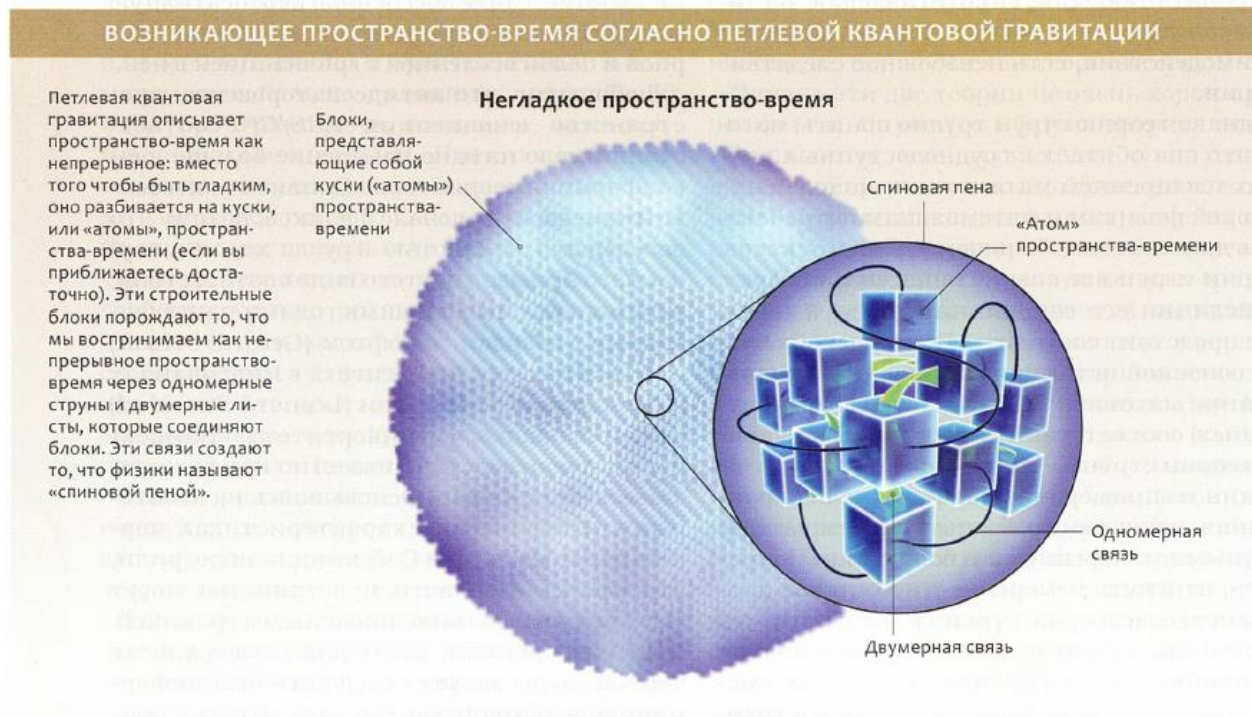
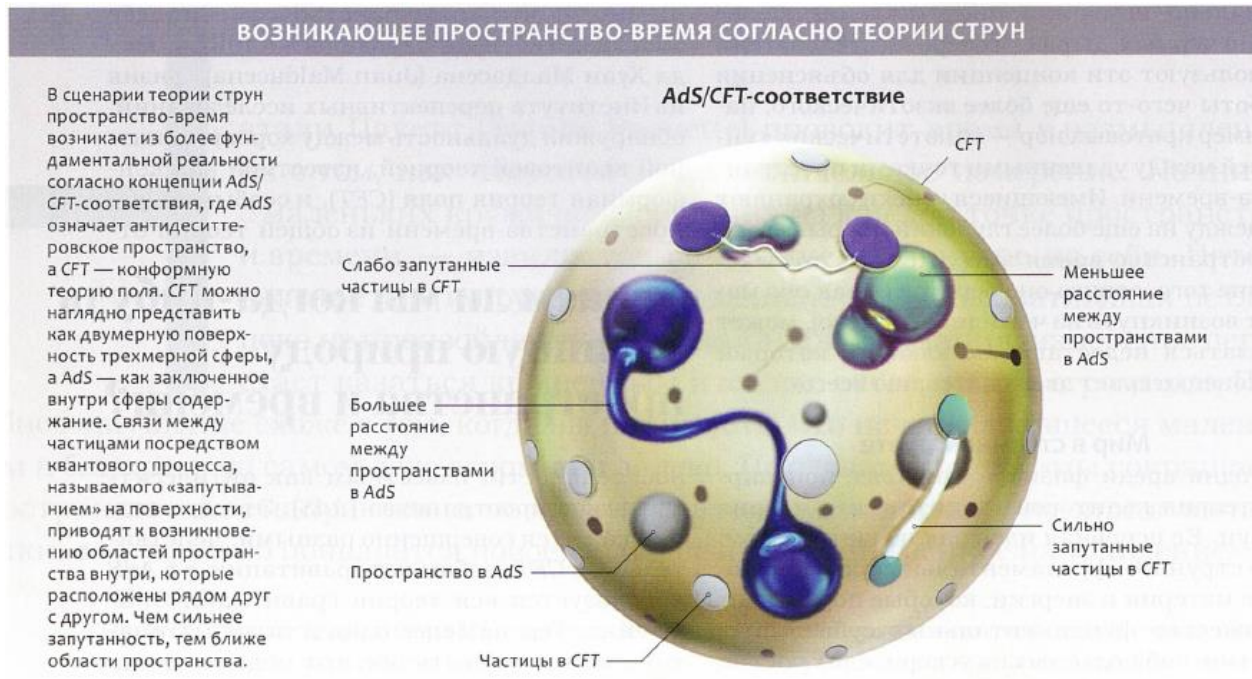
Данные наблюдений из космоса могут появиться не в ближайшее время. Лабораторные эксперименты могут пригодиться, но, как известно философам, вопросы об истинной природе пространства и времени далеко не новые.

Всё то, что существует, "всё есть одно", — писал Парменид, а его ученик Зенон доказывал, что "нет ни падения, ни заполнения тем, что есть".

Парменид настаивал на том, что время и перемены — суть иллюзии, что всё всегда одно и то же. Его ученик Зенон создал знаменитые парадоксы, чтобы доказать точку зрения своего учителя, стремясь показать, что движение на любом расстоянии невозможно. Их работа поднимала вопрос, не иллюзорны ли в некотором смысле наши собственные ощущения, — тревожная перспектива, которая преследует западную философию более двух тысячелетий.

"Тот факт, что древние греки задавали вопросы, которые мы задаём сегодня, — не совпадение. Что-то в природе пространства и времени остаётся глубоко загадочным", — говорит Вютрих. "То, что мы всё ещё задаём эти же вопросы сегодня, говорит нам о более длительном времени их существования".

"Именно возвращаясь назад к этим вопросам, мы многое узнаём и сегодня".



 Из наших архивов

- **Московкин К. Запутанное пространство-время** // ВМН, №5-6, 2017.