

САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ

Ян Амбьорн, Рената Лолл и Ежи Юркевич

Новый подход к проблеме квантовой гравитации, над которой ученые бьются уже многие десятилетия, возвращает к основам и показывает, как «складываются» друг с другом «кирпичики», из которых построены пространство и время

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

■ Общеизвестно, что квантовая теория и общая теория относительности Эйнштейна не стыкуются друг с другом. Физики уже давно пытаются связать их в единую теорию квантовой гравитации, но больших успехов не добились.

■ Предлагаемый новый подход не вводит никаких экзотических положений, но открывает новый путь приложения известных законов к отдельным элементам пространства-времени. Эти элементы приходят в согласие подобно молекулам в кристалле.

■ Наш подход показывает, как известное нам четырехмерное пространство-время может динамически возникнуть из более фундаментальных компонентов. Более того, он позволяет предположить, как это пространство-время в микроскопическом масштабе постепенно переходит от гладкой непрерывности к причудливой фрактальности

Как возникли пространство и время? Как они образовали гладкую четырехмерную пустоту, служащую фоном для нашего физического мира? Как выглядят они при ближайшем рассмотрении? Подобные вопросы возникают на переднем крае современной науки и подталкивают к исследованию квантовой гравитации — до сих пор пока еще не созданного объединения общей теории относительности Эйнштейна с квантовой теорией. Теория относительности описывает, как пространство и время в макроскопическом масштабе могут принимать бесчисленные формы, создавая то, что мы называем силой тяготения или гравитацией. Квантовая теория описывает законы физики, действующие в атомном и субатомном масштабах, полностью игнорируя эффекты гравитации. Теория квантовой гравитации должна описать в квантовых законах природу пространства-времени в самых малых масштабах — пространствах между самыми малыми известными элементарными частицами — и, возможно, объяснить ее через какие-то фундаментальные составляющие.



Квантовая вселенная

Основным кандидатом на эту роль часто называют теорию суперструн, но она пока не дала ответа ни на один из животрепещущих вопросов. Более того, следуя своей внутренней логике, она вскрыла еще более глубокие слои новых экзотических составляющих и взаимоотношений между ними, приводя к ошеломительному разнообразию возможных результатов.

В последние годы наша работа стала перспективной альтернативой изъезженной магистрали теоретической физики. Последовав простейшему рецепту — взять несколько фундаментальных составляющих, собрать их в соответствии с хорошо известными квантовыми принципами (без какой-либо экзотики), хорошенько перемешать и дать отстояться, — вы получите квантовое пространство-время. Процесс достаточно прост, чтобы его можно было смоделировать на портативном компьютере.

Иными словами, если, рассматривая пустое пространство-время (вакуум) как некую нематериальную субстанцию, состоящую из очень большого числа микроскопических бесструктурных элементов, позво-

лить им взаимодействовать между собой в соответствии с простыми правилами теории гравитации и квантовой теории, то эти элементы спонтанно организуются в единое целое, которое во многих отношениях будет выглядеть так же, как наблюдаемая Вселенная. Процесс подобен тому, как молекулы организуются в кристаллическое или аморфное твердое тело.

При таком подходе пространство-время может оказаться похожим скорее на обычное смешанное жаркое, чем на сложный свадебный торт. Более того, в отличие от других подходов к квантовой гравитации, наш очень устойчив. Когда мы меняем детали своей модели, результат практически не изменяется. Такая устойчивость дает основания надеяться, что мы на правильном пути. Если бы результат был чувствителен к тому, куда мы поместили каждый кусочек нашего огромного ансамбля, мы получили бы колоссальное количество равновероятных барочных форм, что исключило бы возможность объяснения того, почему Вселенная оказалась именно такой, какая она есть.

Подобные механизмы самосборки и самоорганизации действуют в физике, биологии и других областях науки. Красивым примером служит поведение больших стай птиц, например скворцов. Отдельные птицы взаимодействуют лишь с небольшим числом соседей; вожака, который объяснял бы им, что нужно делать, нет. Тем не менее стая формируется и движется как единое целое, обладая коллективными, или производными свойствами, не проявляющимися в поведении отдельных особей.

Краткая история квантовой гравитации

Прежние попытки объяснения квантовой структуры пространства-времени как формирующейся в процессе самопроизвольного возникновения не принесли заметного успеха. Они исходили из евклидовой квантовой гравитации. Программа исследований была начата в конце 1970-х гг. и стала популярной благодаря книге «Краткая история времени» (*Brief History of Time*) физика Стивена Хокинга (Stephen Hawking), ставшей бестселлером.

ТЕОРИИ КВАНТОВОЙ ГРАВИТАЦИИ

ТЕОРИЯ СТРУН

Поддерживаемая большинством физиков-теоретиков, эта теория касается не только квантовой гравитации, но и всех видов материи и сил. В ее основе лежит представление, что все частицы (включая гипотетические, переносящие гравитацию) представляют собой колеблющиеся струны

ПЕТЛЕВАЯ КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

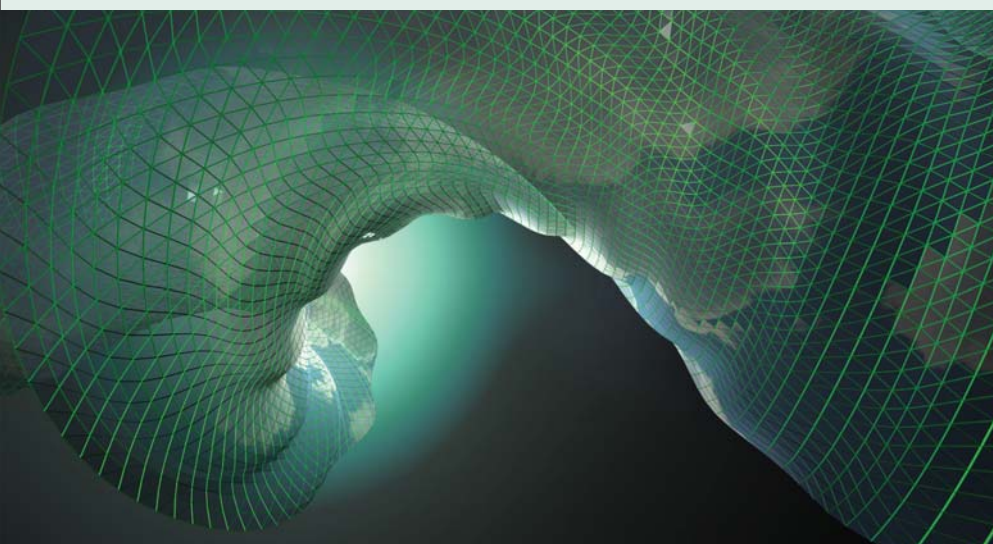
Главная альтернатива теории струн. Она привлекает новый метод применения правил квантовой механики к общей теории относительности Эйнштейна. Пространство делится на дискретные «атомы» объема

ЕВКЛИДОВА КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Подход, получивший известность благодаря физика Стивену Хокингу, основан на предположении, что пространство-время возникает из общего квантового среднего всех возможных форм. В этой теории время считается равноправным с пространственными измерениями

КАУЗАЛЬНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ТРИАНГУЛЯЦИЯ

Этот подход, являющийся темой настоящей статьи, представляет собой современный вариант евклидова подхода. Он основан на аппроксимации пространства-времени мозаикой треугольников с изначальным различением пространства и времени. В малых масштабах пространство-время приобретает фрактальную структуру



Эта программа исходит из принципа суперпозиции, фундаментально для квантовой механики. Любой объект, классический или квантовый, находится в некотором состоянии, характеризуемом, например, положением и скоростью. Но если состояние классического объекта может быть описано свойственным только ему набором чисел, то состояние квантового гораздо богаче: оно является суммой всех возможных классических состояний.

Например, классический бильярдный шар движется по определенной траектории, и его положение и скорость в любой момент могут быть точно определены. В случае

гораздо меньшего электрона все обстоит иначе. Его движение подчиняется квантовым законам, согласно которым электрон может существовать одновременно во множестве мест и обладать множеством скоростей. В отсутствие внешних воздействий из точки A в точку B электрон движется не по прямой, а по всем возможным путям одновременно. Качественная картина всех возможных путей его движения, собранных воедино, переходит в строгий математический «рецепт» для квантовой суперпозиции, сформулированный нобелевским лауреатом Ричардом Фейнманом (Richard Feynman),

и дающий взвешенное среднее всех отдельных возможностей.

Пользуясь предложенным рецептом, можно рассчитать вероятность нахождения электрона в любом конкретном диапазоне положений и скоростей в стороне от прямого пути, по которому он должен был бы двигаться по законам классической механики. Отличительное свойство квантовомеханического поведения частицы — отклонения от единой четкой траектории, т.н. квантовые флуктуации. Чем меньше размер рассматриваемой физической системы, тем больше роль квантовых флуктуаций.

В евклидовой квантовой гравитации принцип суперпозиции применяется ко всей Вселенной в целом. В этом случае суперпозиция состоит не из различных траекторий частицы, а из возможных путей эволюции вселенной во времени, в частности форм пространства-времени. Чтобы свести задачу к виду, позволяющему искать решение, физики обычно рассматривают только общие форму и размер пространства-времени, а не каждое из его мыслимых искажений (см.: Jonathan J. Halliwell, *Quantum Cosmology and the Creation of the Universe* // *Scientific American*, December 1991).

В 1980–1990-х гг. исследования в области евклидовой квантовой гравитации прошли большой технический путь, связанный с разработкой мощных средств компьютерного моделирования. Используемые модели представляли геометрии искривленного пространства-времени с помощью элементарных «кирпичиков», которые для удобства считали треугольными. Сетки из треугольных ячеек позволяют эффективно аппроксимировать искривленные поверхности, поэтому они часто используются в компьютерной анимации. В случае моделирования пространства-времени эти элементарные «кирпичики» представляют собой обобщения треугольников применительно к четырехмерному пространству и называются 4-симплексами. Точно так же как склеивание треугольников их ребрами

позволяет создавать искривленные двумерные поверхности, склеивание «граней» четырехмерных симплексов (представляющих собой трехмерные тетраэдры) позволяет создать модель четырехмерного пространства-времени.

Сами «кирпичики» не имеют прямого физического смысла. Если бы можно было рассматривать пространство-время под сверхмощным микроскопом, никаких треугольников видно бы не было. Они представляют собой лишь аппроксимации. Единственная информация, имеющая физический смысл, содержится в их коллективном поведении в представлении, что каждый из них уменьшился до нулевого размера. В этом пределе геометрия «кирпичиков» (будь они треугольными, кубическими, пятиугольными или представляют собой любую смесь данных форм) не имеет никакого значения.

Нечувствительность к разнообразным мелкомасштабным деталям часто называют универсальностью. Явление, хорошо известное в статистической физике, изучающей движение молекул в газах и жидкостях: молекулы ведут себя почти одинаково, каким бы ни был их состав. Универсальность ассоциируется со свойствами систем, состоящих из большого числа отдельных элементов, и проявляется в масштабе, гораздо большем масштаба отдельной составляющей. Аналогичное утверждение для стаи птиц состоит в том, что окраска, размер, размах крыльев и возраст отдельных птиц не имеют никакого отношения к поведению стаи как целого. В макроскопическом масштабе проявляются лишь очень немногие микроскопические детали.

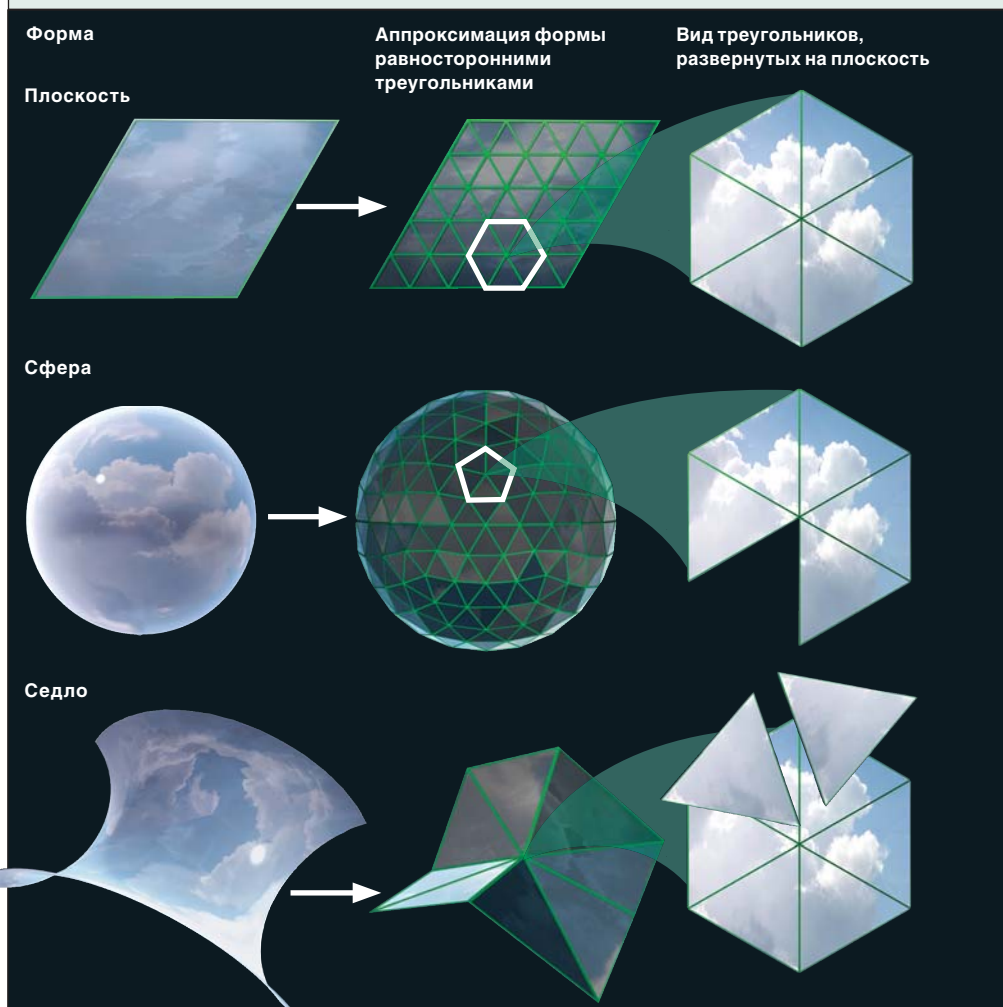
Съезживание

С помощью компьютерных моделей исследователи квантовой гравитации начали изучать эффекты суперпозиции форм пространства-времени, не поддающиеся изучению методами классической теории относительности, в частности сильно искривленные на очень малых расстояниях. Этот так называемый не-

ОПИСАНИЕ ФОРМЫ ПРОСТРАНСТВА

МОЗАИКА ИЗ ТРЕУГОЛЬНИКОВ

Чтобы определить, как пространство формирует себя, физикам в первую очередь нужен способ описания его формы. Они описывают ее, используя треугольники и их аналоги с большим числом измерений, мозаика из которых позволяет аппроксимировать искривленные формы. Кривизна в конкретной точке определяется полным углом, стягиваемым треугольниками, которые окружают эту точку. В случае плоской поверхности этот угол равен в точности 360° , но в случае криволинейных поверхностей он может быть меньше или больше



возмущающий режим больше всего интересует физиков, но почти не поддается анализу без применения компьютеров.

К сожалению, моделирование показало, что евклидова квантовая гравитация не позволяет учесть важные составляющие поведения. Все невозмущающие суперпозиции в четырехмерной вселенной оказались в принципе неустойчивыми. Квантовые флуктуации кривизны в малых масштабах, которые характеризуют различные наложенные

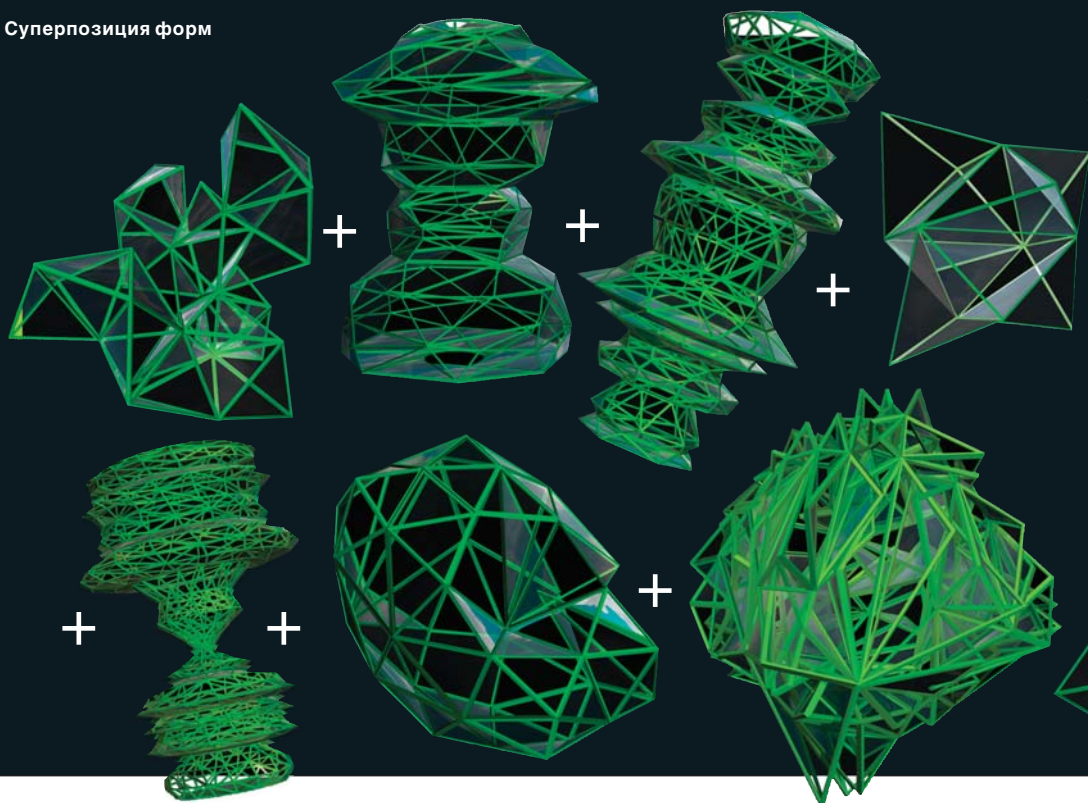
вселенные, вносящие свои вклады в среднее, не компенсируют, а взаимно усиливают друг друга, заставляя все пространство съезжаться в маленький шар с бесконечным числом измерений. В таком пространстве расстояние между любыми двумя точками всегда остается очень малым, даже если его объем огромен. В некоторых случаях пространство обращается в другую крайность, становясь предельно тонким и протяженным, подобно полимеру с большим количеством ветвей. Ни одна

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ ПРАВИЛ К ПРОСТРАНСТВУ-ВРЕМЕНИ

УСРЕДНЕНИЕ

Пространство-время может принимать великое множество разнообразных форм. Согласно квантовой теории, форма, которую мы увидим с наибольшей вероятностью, представляет собой суперпозицию, или взвешенное среднее всех возможных форм. Составляя формы из треугольников, теоретики приписывают каждой из них вес в зависимости от конкретного способа связывания этих треугольников при построении данной формы. Авторы установили: для того чтобы полученное среднее согласовывалось с наблюдаемой реальной Вселенной, треугольники должны подчиняться определенным правилам, в частности содержать встроенные «стрелки», указывающие направление времени

Суперпозиция форм



из этих возможностей не похожа на нашу реальную Вселенную.

Прежде чем еще раз вернуться к допущениям, которые завели физиков в тупик, давайте рассмотрим одну странность полученного результата. «Кирпичики» четырехмерны, но в совокупности образуют либо пространство с бесконечным множеством измерений (съезжившаяся вселенная), либо двухмерное

пространство (вселенная-полимер). Как только допущение о больших квантовых флуктуациях вакуума выпустило джинна из бутылки, возникла возможность изменять самые фундаментальные понятия, например размерность. Возможно, классическая теория гравитации, в которой число измерений всегда считается определенным, не могла предвидеть такого результата.

Одно из следствий может несколько разочаровать любителей научной фантастики. Писатели-фантасты часто используют концепцию пространственно-временных туннелей, будто бы позволяющих сблизить между собой области, далеко отстоящие друг от друга. Они покоряют перспективной возможностью путешествий во времени и передачи сигналов со скоростью, превышающей скорость света. Несмотря на то что ничего подобного никогда не наблюдалось, физики допускают, что подобные туннели могут оказаться реабилитированными в рамках еще не созданной теории квантовой гравитации. В свете отрицательного результата компьютерного моделирования евклидовой квантовой гравитации возможность существования таких туннелей представляется крайне маловероятной. Пространственно-временные туннели имеют такое множество вариантов, что они должны преобладать в суперпозиции, делая ее неустойчивой, так что квантовая вселенная

ОБ АВТОРАХ

Ян Амбьорн (Jan Ambjorn), **Рената Лолл** (Renate Loll) и **Ежи Юркевич** (Jerzy Jurkiewicz) разработали свой подход к проблеме квантовой гравитации в 1998 г. Амбьорн — член Королевской Датской академии, профессор института Нильса Бора в Копенгагене и Утрехтского университета в Нидерландах. Он известен как мастер тайской кухни — обстоятельство, которое издатели стремятся отметить в первую очередь. Рената Лолл занимает пост профессора Утрехтского университета, где она возглавляет одну из крупнейших в Европе групп, занимающихся исследованиями в области квантовой гравитации. Ранее работала в Институте физики гравитации Макса Планка в Гольме (Германия). В редкие часы досуга играет камерную музыку. Ежи Юркевич возглавляет отдел теории сложных систем в Физическом институте Ягеллонского университета в Кракове. В числе его прежних мест работы — Институт Нильса Бора в Копенгагене, где он был покорен красотой парусного спорта.

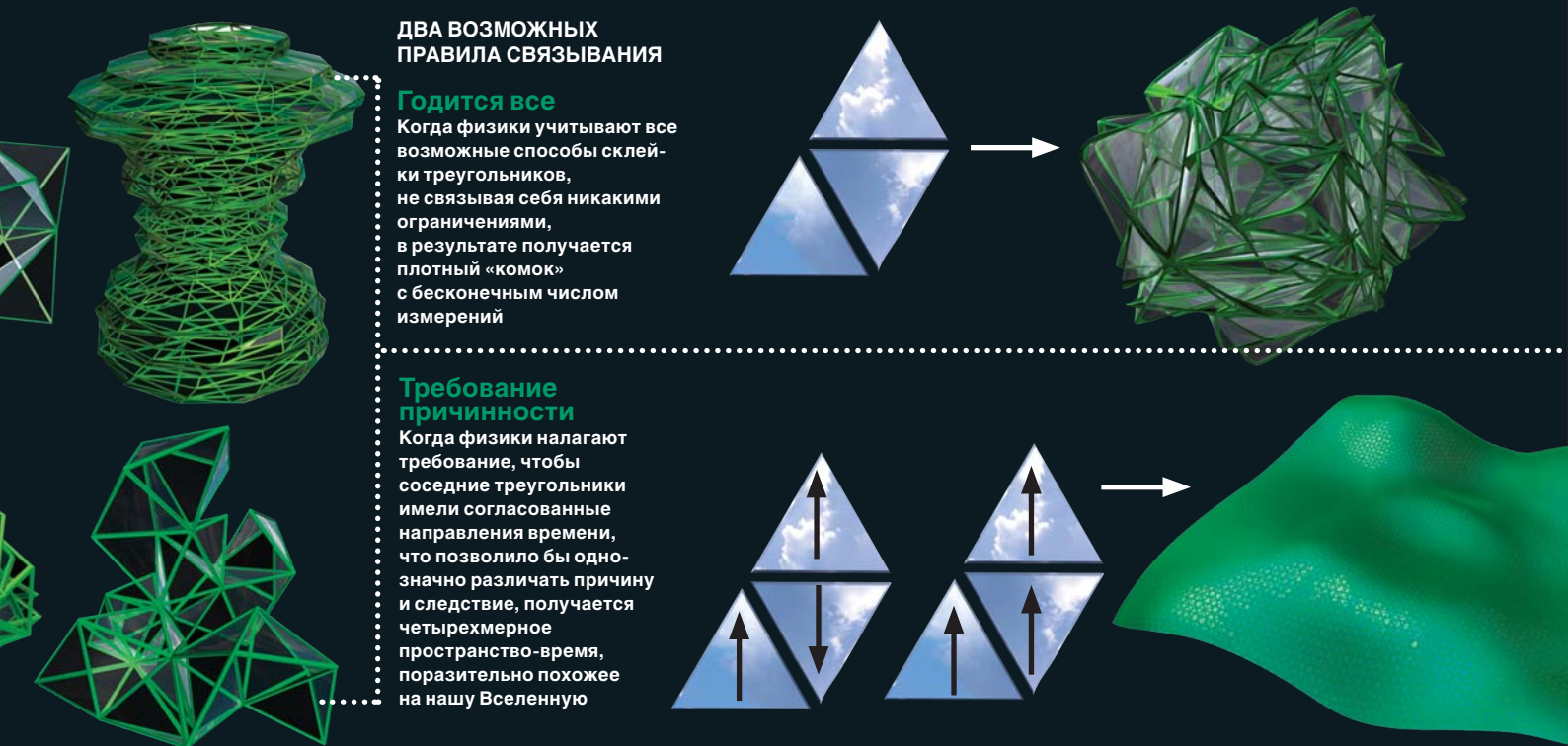
ДВА ВОЗМОЖНЫХ ПРАВИЛА СВЯЗЫВАНИЯ

Годится все

Когда физики учитывают все возможные способы склейки треугольников, не связывая себя никакими ограничениями, в результате получается плотный «комочек» с бесконечным числом измерений

Требование причинности

Когда физики налагают требование, чтобы соседние треугольники имели согласованные направления времени, что позволило бы однозначно различать причину и следствие, получается четырехмерное пространство-время, поразительно похожее на нашу Вселенную



никогда не сможет вырасти за пределы маленькой, но очень сильно взаимосвязанной общности.

В чем может быть корень бед? В поисках брешей и «свободных концов» евклидова подхода мы пришли к ключевой идее — одному компоненту, абсолютно необходимому для возможности приготовления нашего смешанного жаркого: код вселенной должен включать в себя принцип причинности, т.е. структура вакуума должна обеспечивать возможность однозначного различения причины и следствия. Причинность — неотъемлемая часть классических частной и общей теорий относительности.

В евклидову квантовую гравитацию причинность не включена. Определение «евклидова» означает, что пространство и время считаются равнозначными. Вселенные, входящие в евклидову суперпозицию, имеют четыре пространственных измерения вместо одного временного и трех пространственных. Поскольку евклидовы вселенные не имеют

отдельного понятия времени, в них нет структуры, позволяющей располагать события в определенном порядке. У жителей таких вселенных не может быть понятий «причина» и «следствие». Хокинг и другие ученые, использующие евклидов подход, говорили, что «время мнимо» как в математическом, так и в разговорном смысле. Они надеялись, что причинность возникнет как макроскопическое свойство из микроскопических квантовых флуктуаций, не имеющих по отдельности признаков причинностной структуры. Однако компьютерное моделирование перечеркнуло их надежды.

Вместо пренебрежения причинностью при соединении отдельных вселенных в расчете на то, что она возникнет в результате коллективной мудрости суперпозиции, мы решили включить причинностную структуру на гораздо более раннем этапе. Свой метод мы назвали динамической триангуляцией. Мы приписали каждому симплексу стрелку времени, направленную из про-

шлого в будущее. Затем мы ввели причинностное правило «склейки»: два симплекса должны склеиваться таким образом, чтобы их стрелки были сонаправлены. Понятие времени в склеиваемых симплексах должно быть одинаковым: время с постоянной скоростью должно течь в направлении этих стрелок, никогда не останавливаясь и не обращаясь вспять. В ходе времени пространство должно сохранять свою общую форму, не распадаться на отдельные части и не создавать пространственно-временных туннелей.

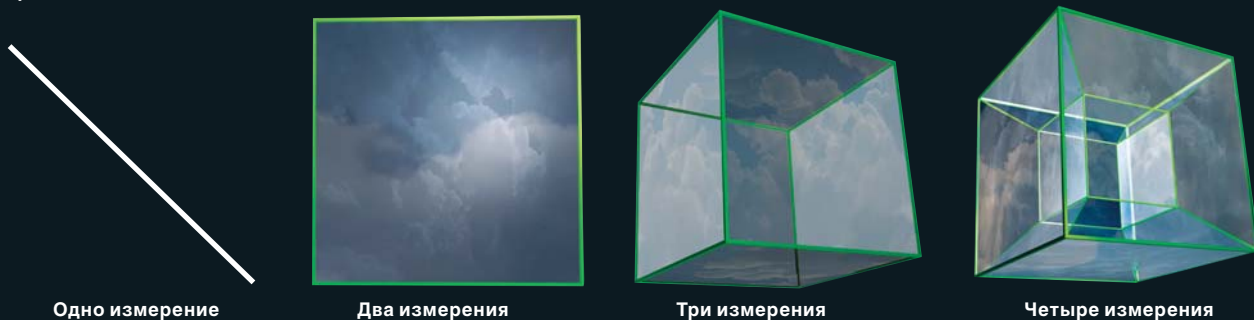
Сформулировав эту стратегию в 1998 г., мы показали на крайне упрощенных моделях, что правила склейки симплексов ведут к макроскопической форме, отличной от евклидовой квантовой гравитации. Это обнадеживало, но не означало, что принятые правила склейки достаточны для обеспечения устойчивости всей четырехмерной вселенной. Поэтому мы затаили дыхание, когда в 2004 г. наш компьютер был

СОВЕРШЕННО НОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ

В обычной жизни размерность пространства — это минимальное число измерений, необходимое для определения положения точки, например долгота, широта и высота. Это определение основано на допущении, что пространство непрерывно и подчиняется законам классической физики. А если пространство ведет себя не так просто? Что если

его форма определяется квантовыми процессами, которые в обычной жизни не проявляются? В таких случаях физики и математики должны разработать более сложное представление о размерности. Число измерений может даже не обязательно быть целым, как в случае фракталов — структур, имеющих одинаковый вид во всех масштабах

ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ РАЗМЕРНОСТИ



ФРАКТАЛЬНЫЕ РАЗМЕРНОСТИ



МНОЖЕСТВО КАНТОРА

Возьмите отрезок прямой, вырежьте из него среднюю треть, из каждой из оставшихся третей вырежьте ее среднюю треть, и так до бесконечности. Получаемый фрактал оказывается больше единичной точки, но меньше непрерывной линии. Его размерность по Хаусдорфу (ниже) равна 0,6309



ПРОКЛАДКА СЕРПИНСКОГО

Эта фигура — треугольник, из которого вырезаются все меньшие треугольнички, — промежуточная между одномерной линией и двумерной поверхностью. Ее размерность по Хаусдорфу равна 1,5850



ГУБКА МЕНГЕРА

Этот фрактал представляет собой куб, из которого вырезаны меньшие кубы, и является поверхностью, простирающейся на часть объема. Ее размерность по Хаусдорфу равна 2,7268, что близко к размерности человеческого мозга

ОБОБЩЕННЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ

Размерность по Хаусдорфу

Определение, сформулированное в начале XX в. немецким математиком Феликсом Хаусдорфом, исходит из зависимости объема V области от ее линейного размера r . В обычном трехмерном пространстве V пропорционально r^3 . Показатель степени в этой зависимости и есть число измерений. «Объемом» могут считаться и другие показатели общего размера, например площадь. В случае прокладки Серпинского V пропорционально $r^{1,5850}$. Это обстоятельство отражает тот факт, что данная фигура не заполняет всю площадь

Спектральная размерность

Данное определение характеризует распространение объекта или явления в среде в ходе времени, будь то капля чернил в сосуде с водой или заболевание в популяции. Каждая молекула воды или индивидум в популяции имеют определенное число ближайших соседей, которое и определяет скорость диффузии чернил или распространения заболевания. В трехмерной среде размер чернильного облака растет пропорционально времени в степени $3/2$. В прокладке Серпинского чернила должны просачиваться сквозь извилистую форму, поэтому распространяются медленнее — пропорционально времени в степени 0,6826, чему соответствует спектральная размерность 1,3652

Применение определений

В общем случае разные способы вычисления размерности дают разные числа измерений, поскольку исходят из различных характеристик геометрии. Для некоторых геометрических фигур число измерений не постоянно. В частности диффузия может быть более сложной функцией, чем время в некоторой постоянной степени.

При моделировании квантовой гравитации упор делается на спектральную размерность. В один элементарный кирпичик модели квантового пространства-времени вводится малое количество некоей субстанции. Из этого кирпичика она распространяется случайным образом. Общее число кирпичиков пространства-времени, которых эта субстанция достигает за некоторый период времени, и определяет спектральную размерность

почти готов дать нам первые расчеты причинностной суперпозиции четырехмерных симплексов. Будет ли это пространство-время вести себя на больших расстояниях как протяженный четырехмерный объект, а не как сморщенный шар или полимер?

Представьте себе наш восторг, когда число измерений расчетной вселенной оказалось равным 4 (точнее, $4,02 \pm 0,1$). Это был первый случай вывода числа измерений, равного наблюдаемому, из основных принципов. Сегодня ввод понятия причинности в модели квантовой гравитации является единственным известным способом справиться с неустойчивостями суперпозиции пространственно-временных геометрий.

Пространство-время в целом

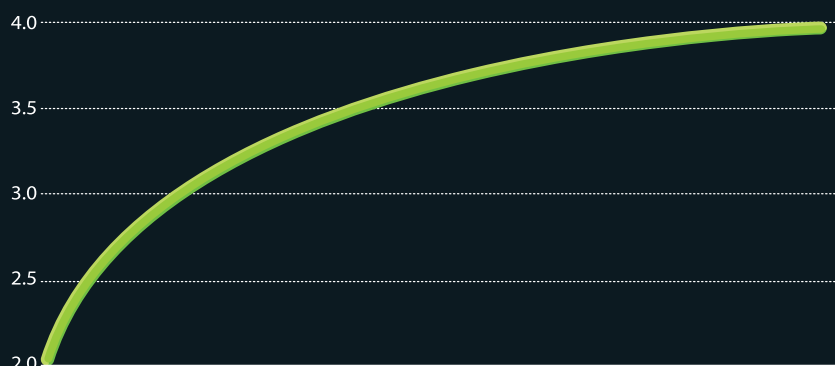
Упомянутое моделирование было первым в продолжающейся серии вычислительных экспериментов, в ходе которых мы пытаемся вывести физические и геометрические свойства квантового пространства-времени посредством компьютерного моделирования. Нашим следующим шагом было исследование формы пространства-времени на больших расстояниях и проверка ее соответствия реальному миру, т.е. предсказаниям общей теории относительности. В случае невозмущающих моделей квантовой гравитации, не содержащих априорного предположения о форме пространства-времени, такая проверка очень трудна — настолько, что в большинстве подходов к квантовой гравитации, включая теорию струн, кроме частных случаев, достигнутые успехи недостаточны для ее проведения.

Как выяснилось, для того чтобы наша модель могла работать, необходимо с самого начала ввести так называемую космологическую постоянную — невидимую и нематериальную субстанцию, содержащуюся в пространстве даже при отсутствии каких-либо других форм материи и энергии. Такая необходимость стала хорошей ново-

УГЛУБЛЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ

Согласно расчетам авторов, спектральная размерность пространства-времени убывает с четырех (в пределе крупного масштаба) до двух (в пределе мелкого масштаба), и непрерывное пространство-время разбивается, превращаясь в разветвленный фрактал. Физики пока не могут понять, означает ли этот вывод, что в итоге пространство-время состоит из локализованных «атомов», или же оно строится из микроскопических структур, очень слабо связанных с обычным понятием геометрии

СПЕКТРАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ



Время диффузии



Квантовое пространство-время может быть подобно снежинке, фрактальной в малых масштабах...



... но гладким и полностью трехмерным в больших масштабах

стью, так как космологи нашли экспериментальное подтверждение существования этой постоянной. Более того, полученная форма пространства-времени соответствовала геометрии де Ситтера, т.е. решению уравнений Эйнштейна для вселенной, не содержащей ничего, кроме космологической постоянной. Поистине замечательно, что составление ансамбля из микроскопических «кирпичиков» практически случайным образом — без каких-либо предположений о симметрии или предпочтительной геометрической структуре — привело к пространству-времени, имеющему в больших масштабах высоко симметричную форму вселенной де Ситтера.

Динамическое возникновение четырехмерной вселенной практи-

чески правильной геометрической формы из основных принципов стало центральным достижением нашего моделирования. Вопрос о том, можно ли понять этот выдающийся результат в рамках представлений о взаимодействии неких еще не установленных «атомов» пространства-времени, и есть цель наших продолжающихся исследований.

Поскольку мы убедились, что наша модель квантовой гравитации прошла ряд классических проверок, пришло время обратиться к экспериментам иного рода — выявлению отличительной квантовой структуры пространства-времени, которую классическая теория Эйнштейна выявить не смогла. В одном из таких экспериментов мы моделировали процесс диффузии: вве-

ЧТО ТАКОЕ ПРИЧИННОСТЬ?

Причинность — это принцип, гласящий, что события происходят в определенной последовательности во времени, а не в беспорядке, что позволяет различать причину и следствие. В подходе к квантовой гравитации, принятом авторами, отличие причины от следствия выступает как фундаментальное по своей природе, а не выведенное свойство



ли в суперпозицию вселенных подходящий аналог чернильной капли и наблюдали, как она распространяется и возмущается квантовыми флуктуациями. Нахождение размера чернильного облака по прошествии некоторого времени позволяло нам определить число измерений в пространстве (врезка на стр. 25).

Результат оказался ошеломляющим: число измерений зависит от масштаба. Иными словами, если диффузия продолжалась короткое время, то число измерений пространства-времени оказывалось иным, чем когда процесс диффузии шел долгое время. Даже те из нас, кто специализировался на квантовой гравитации, с трудом могли вообразить, как могло число измерений пространства-времени непрерывно изменяться в зависимости от разрешения нашего «микроскопа». Очевидно, пространство-время для малых объектов сильно отличается от такового для больших. Для малых объектов вселенная подобна фрактальной структуре — необычному виду пространства, в котором понятия размера просто не существует. Оно самоподобно, т.е. выглядит одинаковым во всех масшта-

бах. Это значит, что не существует каких-либо объектов характеристического размера, которые могли бы служить чем-то вроде масштабной линейки.

Насколько мало это «малое»? Вплоть до размера около 10^{-34} м квантовая вселенная в целом хорошо описывается классической четырехмерной геометрией де Ситтера, хотя с уменьшением расстояния роль квантовых флуктуаций возрастает. Тот факт, что классическое приближение остается пригодным вплоть до столь малых расстояний, удивителен. Из него вытекают очень важные следствия как для самых ранних этапов истории вселенной, так и для ее очень отдаленного будущего. В обоих этих пределах вселенная практически пуста. На самом начальном этапе квантовые флуктуации были столь велики, что материя едва обнаруживалась. Она была крошечным плотом в волнуемом океане. Через миллиарды лет после нас из-за быстрого расширения Вселенной вещество окажется настолько разреженным, что будет играть очень малую роль или даже вовсе не будет играть роли. Наш подход позволяет объяснить форму пространства в обоих предельных случаях.

В еще меньших масштабах квантовые флуктуации пространства-времени возрастают настолько, что классические интуитивные представления о геометрии полностью теряют смысл. Число измерений уменьшается с классических четырех примерно до двух. Однако, насколько мы можем судить, пространство-время остается непрерывным и не содержит каких-либо туннелей. Оно не столь экзотично, как бурлящая пространственно-временная пена, какой его видели физик Джон Уиллер (John Wheeler) и многие другие. Геометрия пространства-времени подчиняется необычным и неклассическим законам, но понятие расстояния остается применимым. Сейчас мы пытаемся проникнуть в область еще меньших масштабов. Одна из возможностей состоит в том, что все-

ленная становится самоподобной и при всех масштабах, меньших некоторого предела, выглядит одинаково. Если так, то вселенная не состоит из струн или атомов пространства-времени, а является миром бесконечной скуки: структура, найденная чуть ниже порога, по мере углубления в область все меньших размеров будет просто до бесконечности повторять себя.

Как смогут физики обойтись меньшим числом составляющих и технических средств, чем использовали мы для построения квантовой вселенной с реалистическими свойствами, трудно представить. Нам еще предстоит провести много проверок и экспериментов, например для того чтобы понять поведение вещества во Вселенной и его влияние на ее общую форму. Наша главная цель, как в случае любой теории квантовой гравитации, состоит в предсказании поддающихся наблюдению следствий, выведенных из микроскопической квантовой структуры. Это будет решающим критерием правильности нашей модели как теории квантовой гравитации. ■

Перевод: И.Е. Сацевич

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Deriving Dimensions. Adrian Cho in Physical Review Focus; September 28, 2004. <http://focus.aps.org/story/v14/st13>
- Planckian Birth of a Quantum de Sitter Universe. J. Ambjorn, A. Gorlich, J. Jurkiewicz and R. Loll in Physical Review Letters, Vol. 100, Article No. 091304; March 7, 2008. Есть препринт на arxiv.org/abs/0712.2485
- The Complete Idiot's Guide to String Theory. George Musser. Alpha, 2008.
- The Emergence of Spacetime, or, Quantum Gravity on Your Desktop. R. Loll in Classical and Quantum Gravity, Vol. 25, No. 11, Article No. 114006; June 7, 2008. arxiv.org/abs/0711.0273
- Веб-сайт Ренаты Лолл: www.phys.uu.nl/~loll