

ПЛАНЕТАРИЙ

АЛЕКСАНДР ВИЛЕНКИН

Одна Вселенная или множество?



Как выглядит Вселенная на очень больших расстояниях, в областях, недоступных наблюдению? И есть ли предел тому, как далеко мы можем заглянуть? Наш космический горизонт определяется расстоянием до самых далеких объектов, свет которых успел прийти к нам за 14 миллиардов лет с момента Большого взрыва. Из-за ускоренного расширения Вселенной эти объекты сейчас удалены уже на 40 миллиардов световых лет. От более далеких объектов свет к нам еще не дошел. Так что же находится там, за горизонтом?

До недавнего времени физики давали очень простой ответ на этот вопрос: там все то же самое — такие же галактики, такие же звезды. Но современные достижения в космологии и физике элементарных частиц позволили пересмотреть эти представления. В новой картине мира отдаленные области Вселенной разительно отличаются от того, что мы видим вокруг себя, и могут даже подчиняться иным законам физики.

Новые представления основаны на теории космической инфляции. Попробуем разъяснить ее суть. Начнем с краткого обзора стандартной космологии Большого взрыва, которая была доминирующей теорией до открытия инфляции.

Согласно теории Большого взрыва Вселенная началась с колоссальной катастрофы, которая разразилась около 14 миллиардов лет назад. Большой взрыв случился не в каком-то определенном месте Вселенной, а сразу везде. В то время не было звезд, галактик и даже атомов, и Вселенную заполнял очень горячий плотный и быстро расширяющийся сгусток материи и излучения. Увеличиваясь в размерах, он остывал. Примерно три минуты спустя после Большого взрыва температура снизилась достаточно для формирования атомных ядер, а через полмиллиона лет электроны и ядра объединились в электрически нейтральные атомы и Вселенная стала прозрачна для света. Это позволяет нам сегодня регистрировать свет, испущенный огненным сгустком. Он приходит со всех направлений на небе и называется космическим фоновым излучением.

Первоначально огненный сгусток был почти идеально однородным. Но крошечные неоднородности в нем все-таки были: в некоторых областях плотность была чуть выше, чем в других. Эти неоднородности

росли, стягивая своей гравитацией все больше вещества из окружающего пространства, и за миллиарды лет превратились в галактики. И лишь совсем недавно по космическим меркам на сцене появились мы, люди.

В пользу теории Большого взрыва говорит множество наблюдательных данных, не оставляющих сомнений в том, что этот сценарий в основном корректен. Прежде всего мы видим, как далекие галактики разбегаются от нас с очень большими скоростями, что указывает на расширение Вселенной. Также теория Большого взрыва объясняет распространенность во Вселенной легких элементов, таких как гелий и литий. Но самой главной уликой, можно сказать, дымящимся стволом Большого взрыва, служит космическое фоновое излучение — послесвечение первичного огненного шара, до сих пор позволяющее его наблюдать и исследовать. За его изучение присуждены уже две Нобелевские премии.

Итак, мы, похоже, располагаем весьма успешной теорией. И все же она оставляет без ответа некоторые интригующие вопросы, касающиеся начального состояния Вселенной сразу после Большого взрыва. Почему Вселенная была такой горячей? Почему она стала расширяться? Почему она была такой однородной? И, наконец, что было с ней до Большого взрыва?

На все эти вопросы отвечает теория инфляции, которую Алан Гут выдвинул 28 лет назад.

КОСМИЧЕСКАЯ ИНФЛЯЦИЯ

Центральную роль в этой теории играет особая форма материи, называемая ложным вакуумом. В обычном понимании этого слова вакуум — просто абсолютно пустое пространство. Но для физиков, занимающихся элементарными частицами, вакуум — далеко не полное ▶

ничто, а физический объект, обладающий энергией и давлением, который может находиться в различных энергетических состояниях. Физики называют эти состояния разными вакуумами, от их характеристик зависят свойства элементарных частиц, которые могут в них существовать. Связь между частицами и вакуумом подобна связи звуковых волн с веществом, по которому они распространяются: в разных материалах скорость звука неодинакова. Мы живем в очень низкоэнергетическом вакууме, и долгое время физики считали, что энергия нашего вакуума в точности равна нулю. Однако недавно наблюдения показали, что он обладает немного отличной от нуля энергией (она получила название темной энергии).

Современные теории элементарных частиц предсказывают, что помимо нашего вакуума существует ряд других, высокоэнергетических вакуумов, называемых ложными. Наряду с очень высокой энергией ложный вакуум характеризуется большим отрицательным давлением, которое называют натяжением. Это то же самое, что растянуть кусок резины: появляется натяжение — сила, направленная внутрь, которая заставляет резину сжиматься.

Но самое странное свойство ложного вакуума — это его отталкивающая гравитация. Согласно общей теории относительности Эйнштейна гравитационные силы вызваны не только массой (то есть энергией), но также и давлением. Положительное давление вызывает гравитационное притяжение, а отрицательное ведет к отталкиванию. В случае вакуума отталкивающее действие давления превосходит притягивающую силу, связанную с его энергией, и в сумме получается отталкивание. И чем выше энергия вакуума, тем оно сильнее.

А еще ложный вакуум нестабилен и обычно очень быстро распадается, превращаясь в низкоэнергетический вакуум. Избыток энергии идет на порождение огненного сгустка

элементарных частиц. Тут важно подчеркнуть, что Алан Гут не изобретал ложный вакуум со столь странными свойствами специально для своей теории. Его существование следует из физики элементарных частиц.

Гут просто предположил, что в самом начале истории Вселенной пространство находилось в состоянии ложного вакуума. Почему так случилось? Хороший вопрос, и тут есть что сказать, но мы вернемся к этому вопросу в конце статьи. А пока предположим вслед за Гуттом, что молодая Вселенная была заполнена ложным вакуумом. В таком случае вызываемая им отталкивающая гравитация привела бы к очень быстрому ускоряющемуся расширению Вселенной. При таком типе расширения, который Гут назвал инфляцией, существует характерное время удвоения, за которое размер Вселенной увеличивается в два раза. Это похоже на инфляцию в экономике: если ее темпы постоянны, то цены удваиваются, скажем, за 10 лет. Космологическая инфляция идет намного быстрее, с такой скоростью, что за малую долю секунды крошечная область поперечником меньше атома раздувается до размеров, превышающих наблюдаемую сегодня часть Вселенной.

Поскольку ложный вакуум нестабилен, он в итоге распадется, порождая огненный сгусток, и на этом инфляция заканчивается. Распад ложного вакуума играет в этой теории роль Большого взрыва. С этого момента Вселенная развивается в соответствии с предсказаниями стандартной космологии Большого взрыва.

ОТ УМОЗРЕНИЯ К ТЕОРИИ

Теория инфляции естественным образом объясняет особенности начального состояния, которые прежде казались такими загадочными. Высокая температура возникает из-за высокой энергии ложного вакуума. Расширение связано с отталкивающей гравитацией, которая заставляет ложный вакуум расширяться, а огненный сгусток

С появлением теории инфляции Большой взрыв перестал быть единственным уникальным событием. Согласно ей вселенные возникают и расширяются, как пузырьки в бокале шампанского. И таких «бокалов» может быть множество



продолжает расширяться по инерции. Вселенная однородна потому, что ложный вакуум везде имеет строго одинаковую плотность энергии (за исключением малых неоднородностей, которые связаны с квантовыми флуктуациями в ложном вакууме).

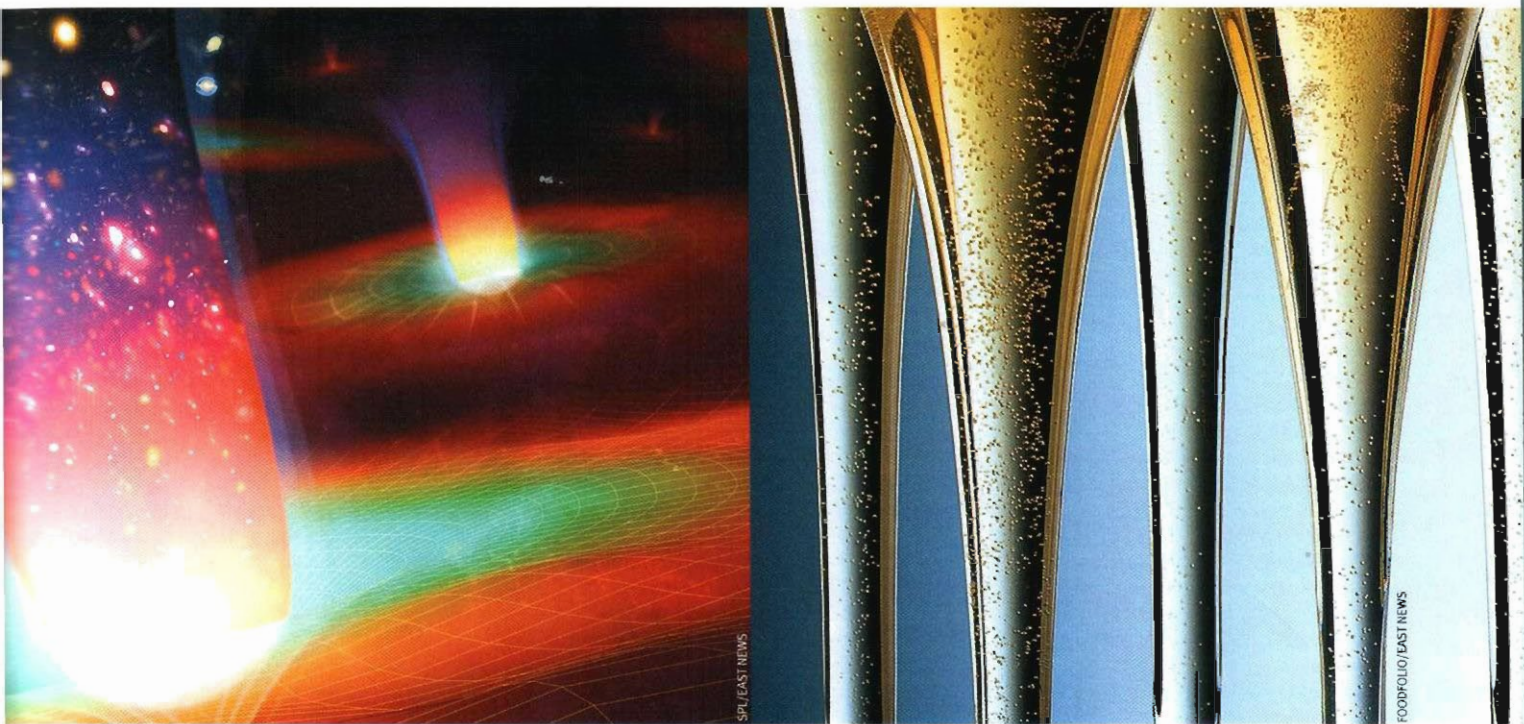
Когда теория инфляции впервые была обнародована, ее восприняли лишь как умозрительную гипотезу. Но теперь, спустя 28 лет, она получила впечатляющие наблюдательные подтверждения, большинство из которых связано с космическим фоновым излучением. Спутник WMAP построил карту интенсивности излучения для всего неба и обнаружил, что видимый на ней пятнистый узор находится в безупречном согласии с теорией.

Есть и еще одно предсказание инфляции, состоящее в том, что Вселенная должна быть почти плоской. Согласно общей теории относительности Эйнштейна пространство может быть искривлено, однако теория инфляции предсказывает, что наблюдаемая нами область Вселенной должна с высокой точностью описываться плоской, евклидовой, геометрией. Вообразите искривленную поверхность сферы. Теперь мысленно увеличьте эту поверхность в огромное число раз. Это как раз то, что случилось со Вселенной во время инфляции. Нам видна лишь крошечная часть этой огромной сферы. И она кажется плоской точно так же, как Земля, когда мы рассматриваем небольшой ее участок. То, что



РАСПАД ЛОЖНОГО ВАКУУМА

Компьютерная модель вечной инфляции. Ложный вакуум (желтый) расширяется вдвое каждые 10^{33} секунд. В областях, где он распался (синие), образовались вселенные, подобные нашей. На границах происходит «большой взрыв»



геометрия Вселенной плоская, было проверено путем измерения углов гигантского треугольника размером почти до космического горизонта. Их сумма составила 180 градусов, как и должно быть при плоской, евклидовой, геометрии.

Теперь, когда данные, полученные в наблюдаемой нами области Вселенной, подтвердили теорию инфляции, можно в какой-то степени доверять тому, что она говорит нам о регионах, недоступных для наблюдения. Это возвращает нас к вопросу, с которого мы начали: что лежит за нашим космическим горизонтом?

МИР БЕСКОНЕЧНЫХ ДВОЙНИКОВ

Ответ, который дает теория, довольно неожиданный: хотя в нашей части космоса инфляция закончилась, во Вселенной в целом она продолжается. То там, то здесь в ее толще случаются «большие взрывы», в которых распадается ложный вакуум и возникает область космоса, подобная нашей. Но инфляция никогда не закончится полностью, во всей Вселенной. Дело в том, что распад вакуума — вероятностный процесс, и в разных областях он случается в разное время. Выходит, Большой взрыв не был уникальным событием в нашем прошлом. Множество «взрывов» случилось прежде и несчетное число еще произойдет в будущем. Этот никогда не кончающийся процесс называется вечной инфляцией.

Можно попробовать представить, как бы выглядела инфлирующая Вселенная, если взглянуть на нее со стороны. Пространство было бы заполнено

ложным вакуумом и очень быстро расширялось во все стороны. Распад ложного вакуума похож на закипание воды. То там, то здесь спонтанно возникают пузыри низкоэнергетического вакуума. Едва зародившись, пузыри начинают расширяться со скоростью света. Но они очень редко сталкиваются, поскольку пространство между ними расширяется еще быстрее, образуя место для все новых и новых пузырей. Мы живем в одном из них и видим только малую его часть.

К сожалению, путешествия в другие пузыри невозможны. Даже забравшись в космический корабль и двигаясь почти со скоростью света, нам не угнаться за расширяющимися границами нашего пузыря. Так что мы являемся его пленниками. С практической точки зрения каждый пузырь является самостоятельной отдельной вселенной, у которой нет связи с другими пузырями. В ходе вечной инфляции порождается бесконечное число таких пузырей-вселенных.

Но если нельзя добраться до других пузырей-вселенных, как же убедиться, что они действительно существуют? Одна из впечатляющих возможностей — наблюдение за столкновением пузырей. Если бы другой пузырь ударился в наш, это оказалось бы заметное воздействие на наблюдаемое космическое фоновое излучение. Проблема, однако, в том, что столкновения пузырей очень редки, и не факт, что такое событие случалось в пределах нашего горизонта.

Удивительный вывод следует из этой картины мира: поскольку число

вселенных-пузырей бесконечно и каждая из них неограниченно расширяется, в них будет содержаться бесконечное число областей размером с наш горизонт. У каждой такой области будет своя история. Под «историей» имеется в виду все, что случилось, вплоть до мельчайших событий, таких как столкновение двух атомов. Ключевой момент состоит в том, что число различных историй, которые могут иметь место, — конечно. Как это возможно? Например, я могу подвинуть свой стул на один сантиметр, на полсантиметра, на четверть и так далее: кажется, что уже здесь таится неограниченное число историй, поскольку я могу сдвинуть стул бесконечным числом разных способов на сколь угодно малое расстояние. Однако из-за квантовой неопределенности слишком близкие друг к другу истории принципиально невозможно различить. Таким образом, квантовая механика говорит нам, что число различных историй конечно. С момента Большого взрыва для наблюдаемой нами области оно составляет примерно 10^{10^50} . Это невообразимо большое число, но важно подчеркнуть, что оно не бесконечно.

Итак, ограниченное количество историй разворачивается в бесконечном числе областей. Неизбежен вывод, что каждая история повторяется бесконечное число раз. В частности, существует бесконечное число земель с такими же историями, как у нашей. Это значит, что десятки ваших дублей сейчас читают эту фразу. Должны ▶

существовать также области, истории которых в чем-то отличаются, реализуя все возможные вариации. Например, есть области, в которых изменена лишь кличка вашей собаки, а есть другие, где по Земле до сих пор ходят динозавры. Хотя, конечно, в большинстве областей нет ничего похожего на нашу Землю: ведь куда больше способов отличаться от нашего космоса, чем быть на него похожим. Эта картина может показаться несколько угнетающей, но ее очень трудно избежать, если признается теория инфляции.

ПУЗЫРИ МУЛЬТИВЕРСА

До сих пор мы предполагали, что другие вселенные-пузыри похожи между собой по своим физическим свойствам. Но это необязательно должно быть так. Свойства нашего мира определяются набором чисел, называемых фундаментальными постоянными. Среди них Ньютонова гравитационная постоянная, массы элементарных частиц, их электрические заряды и тому подобное. Всего существует около 30 таких констант, и возникает вполне естественный вопрос: почему у них именно такие значения, которые есть? Долгое время физики мечтали, что однажды смогут вывести значения констант из некоей фундаментальной теории. Но существенного прогресса на этом пути достигнуто не было.

Если выписать на листок бумаги значения известных фундаментальных постоянных, они покажутся

совершенно случайными. Некоторые из них очень малы, другие велики, и за этим набором чисел не просматривается никакого порядка. Однако в них все же была замечена система, хотя и несколько иного рода, чем надеялись обнаружить физики. Значения констант, похоже, тщательно «подобраны» для обеспечения нашего существования. Это наблюдение получило название антропного принципа. Константы будто специально тонко настроены Творцом, чтобы создать подходящую для жизни Вселенную — это как раз то, о чем говорят нам сторонники учения о разумном замысле.

Но существует иная возможность, рисующая совсем другой образ Творца: он произвольным образом порождает множество вселенных, и чисто случайно некоторые из них оказываются пригодными для жизни. Появившиеся в таких редких вселенных разумные наблюдатели обнаруживают чудесную тонкую настройку констант. В этой картине мира, называемой Мультиверсом, большинство пузырей бесплодно, но в них нет никого, кто мог бы на это пожаловаться.

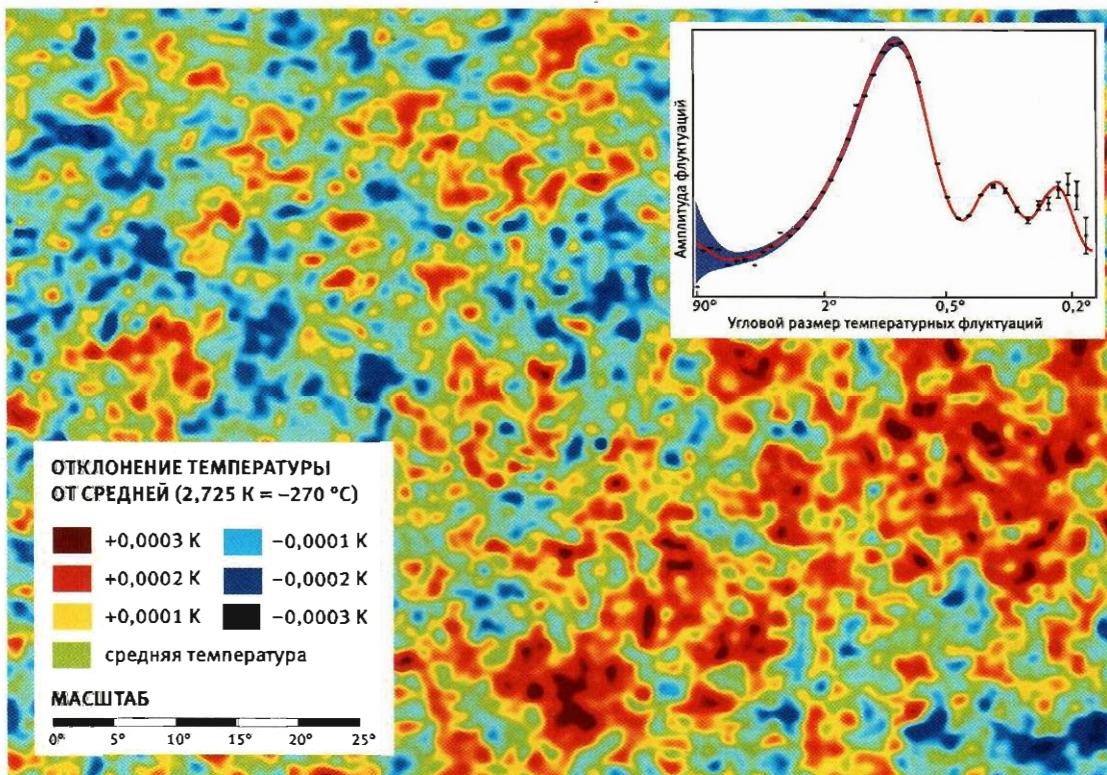
Но как проверить концепцию Мультиверса? Прямые наблюдения ничего не дадут, поскольку мы не можем путешествовать в другие пузыри. Можно, однако, как в криминальном расследовании, найти косвенные улики. Если константы изменяются от одной вселенной к другой, их значения у нас нельзя точно

предсказать, но можно сделать вероятностные предсказания. Можно спросить: какие значения обнаружит среднестатистический наблюдатель? Это аналогично попытке предсказать рост первого встречного человека на улице. Вряд ли он окажется гигантом или карликом, поэтому если дать прогноз, что его рост будет где-то около среднего, мы, как правило, не ошибемся. Аналогично и с фундаментальными постоянными: нет оснований думать, что их значения в нашей области космоса очень велики или малы, иными словами, они существенно отличаются от тех, что измерит большинство наблюдателей во Вселенной. Предположение о нашей неисключительности — это важная идея; я назвал ее принципом заурядности.

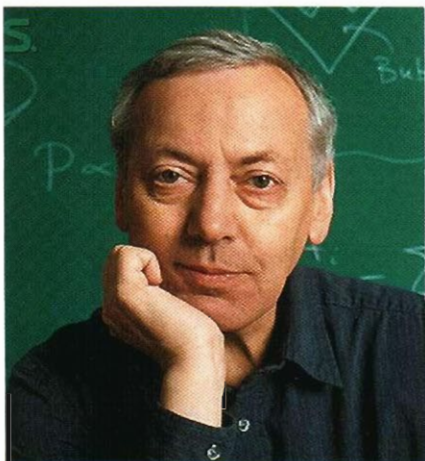
Этот подход был применен к так называемой космологической постоянной, которая характеризует плотность энергии нашего вакуума. Значение этой постоянной, полученное из астрономических наблюдений, оказалось в хорошем согласии с предсказаниями, основанными на концепции Мультиверса. Это стало первым свидетельством существования там, за горизонтом, поистине колоссальной вечно инфлирующей Вселенной. Это свидетельство, конечно, косвенное, каким только и могло быть. Но если нам посчастливится сделать еще несколько удачных предсказаний, то новую картину мира можно будет признать доказанной за пределами разумных сомнений.

ФРАГМЕНТ ТЕПЛОВОЙ КАРТЫ НЕБЕСНОГО СВОДА

Квантовые флуктуации распавшегося в Большом взрыве ложного вакуума оставили пятнистые следы на температурной карте космического микроволнового фона. Космологов интересует распределение расстояний между тепловыми пятнами: данные пятилетних наблюдений зонда WMAP хорошо ложатся на теоретическую кривую. Запущенная в мае европейская космическая обсерватория «Планк» должна уточнить данные на правом краю графика



NASA/WMAP



CORBIS/PHOTO SA

ОБ АВТОРЕ

Александр Виленкин — директор Института космологии в Университете Тафтса (Бостон, штат Массачусетс). Он окончил Харьковский университет в 1971 году, в 1976-м эмигрировал из СССР, в 1978-м стал профессором Университета Тафтса. Виленкин — один из ведущих современных космологов, автор концепции вечной инфляции, появившейся как развитие инфляционной космологии Алана Гута, совместно с которым написал ряд научных работ. Известна полемика между Александром Виленкиным и Стивеном Хокингом по вопросу о том, как именно случилось квантовое рождение Вселенной. Виленкин является сторонником антропного принципа, согласно которому существует множество вселенных и лишь немногие из них пригодны для жизни разумных обитателей. Причем Виленкин считает, что из антропного принципа можно получить нетривиальные предсказания, позволяющие подтвердить существование недоступных наблюдению вселенных. Бурные дискуссии вызвала научно-популярная книга Александра Виленкина «Мир множества миров: в поисках других вселенных», опубликованная на английском языке. В этом году она выходит на русском.

ЧТО БЫЛО ДО БОЛЬШОГО ВЗРЫВА?

А было ли у Вселенной начало? Мы описали безгранично расширяющийся космос, порождающий все новые «большие взрывы», но хотелось бы знать, всегда ли Вселенная была такой? Многие находят такую возможность весьма привлекательной, поскольку она избавляет от некоторых трудных вопросов, связанных с началом Вселенной. Когда Вселенная уже существует, ее эволюция описывается законами физики. Но как описывать ее начало? Что заставило Вселенную появиться? И кто задал ей начальные условия? Было бы весьма удобно сказать, что Вселенная всегда пребывает в состоянии вечной инфляции без конца и без начала.

Эта идея, однако, сталкивается с неожиданным препятствием. Арвинд Борд и Алан Гут доказали теорему, которая утверждает, что хотя инфляция вечна в будущем, она не может быть вечной в прошлом, а это значит, что у нее должно быть какое-то начало. И каково бы оно ни было, мы можем продолжать спрашивать: а что было до того? Получается, что один из основных вопросов космологии — с чего началась Вселенная? — так и не получил удовлетворительного ответа.

Единственный предложенный до сих пор способ обойти эту проблему бесконечной регрессии состоит в том, что Вселенная могла быть спонтанно создана из ничего. Часто говорят: ничто не может появиться из ничего. Действительно, материя обладает положительной энергией, и закон ее сохранения требует, чтобы в любом начальном состоянии энергия была такой же. Однако математический факт состоит в том, что замкнутая вселенная обладает нулевой энергией. В общей теории относительности Эйнштейна пространство может быть искривленным и замыкаться на себя подобно поверхности сферы.

Если в такой замкнутой вселенной двигаться все время в одну сторону, то в конце концов вернешься туда, откуда стартовал, — точно так же, как возвращаешься в исходную точку, обойдя вокруг Земли. Энергия материи положительна, но энергия гравитации — отрицательна, и можно строго доказать, что в замкнутой вселенной их вклады в точности компенсируют друг друга, так что полная энергия замкнутой вселенной равна нулю. Другая сохраняющаяся величина — электрический заряд. И тут тоже оказывается, что полный заряд замкнутой вселенной должен быть нулевым.

Если все сохраняющиеся величины в замкнутой вселенной равны нулю, то ничто не препятствует ее спонтанному появлению из ничего. В квантовой механике любой процесс, который не запрещен строгими законами сохранения, с некоторой вероятностью будет происходить. А значит, замкнутые вселенные должны появляться из ничего подобно пузырькам в бокале шампанского. Эти новорожденные вселенные могут быть разного размера и заполнены разными типами вакуума. Анализ показывает, что наиболее вероятные вселенные имеют минимальные начальные размеры и наивысшую энергию вакуума. Стоит появиться такой вселенной, как немедленно под влиянием высокой энергии вакуума она начинает расширяться. Именно так и начинается история вечной инфляции.

КОСМОЛОГИЯ БЛАЖЕННОГО АВГУСТИНА

Следует оговориться, что аналогия между возникающими из ничего вселенными и пузырьками шампанского не совсем точна. Пузырьки рождаются в жидкости, а у вселенной нет никакого окружающего пространства. Зародившаяся замкнутая вселенная — это и есть все имеющееся

пространство. До ее появления никакого пространства не существует, как не существует и времени. В общей теории относительности пространство и время связаны в единую сущность, называемую «пространством-временем», и время начинает свой отсчет лишь после того, как появляется Вселенная.

Нечто подобное много столетий назад было описано Августином Блаженным. Он пытался понять, что делал Бог до того, как создал небеса и землю. Свои размышления над этой проблемой Августин изложил в замечательной книге «Исповедь». Вывод, к которому он в итоге пришел, состоит в том, что Бог должен был создать время вместе со Вселенной. До того не было времени, а значит, бессмысленно спрашивать, что было раньше. Это очень похоже на ответ, который дает современная космология.

Вы можете спросить: что заставило Вселенную появиться из ничего? Как это ни удивительно, никакой причины не требуется. Если взять радиоактивный атом, он распадется, и квантовая механика предсказывает вероятность его распада за определенный интервал времени, скажем, за минуту. Но если спросить, почему атом распался именно в данный конкретный момент, а не в другой, то ответ будет состоять в том, что не было никакой причины: этот процесс совершенно случаен. Аналогично не требуется причины и для квантового создания Вселенной.

Законы физики, которые описывают квантовое рождение Вселенной, — те же самые, что описывают ее последующую эволюцию. Из этого, по-видимому, следует, что законы существовали в некотором смысле прежде, чем возникла Вселенная. Иными словами, законы, похоже, не являются описанием Вселенной, а обладают неким платоновским существованием, помимо самой Вселенной. Мы пока не знаем, как это понимать. ●