

Мартин Боджовальд

В ПОГОНЕ ЗА СКАЧУЩЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Возможно, Большой взрыв не был началом нашей Вселенной — она могла образоваться в результате управляемого сложными гравитационно-квантовыми эффектами Большого отскока, стремительного сжатия, породившего взрыв

В современной науке понятие атома — настолько общепринятая концепция, что трудно вспомнить, насколько радикальным оно было когда-то. Когда больше века назад ученые впервые ввели в рассмотрение атомы, далеко не всех обрадовала необходимость наблюдать повсюду нечто столь малое, а многие даже спорили, насколько научной можно считать эту новую парадигму. Тем не менее факты в пользу существования атомов постепенно накапливались, и в 1905 г. после работы А. Эйнштейна, посвященной анализу броуновского движения (произвольно перемещающихся твердых частиц в жидкой среде), наличие в природе атомов стало очевидным. Но затем ученым потребовалось еще



20 лет для развития теории, объясняющей природу и свойства атомов, — квантовой механики. И еще 30 лет понадобилось физика Эрвину Мюллеру (Erwin Muller), чтобы создать с помощью микроскопа первые изображения атомов. В современном обществе мировая индустрия базируется на свойствах материи, состоящей из атомов.

Процесс понимания структуры пространства-времени следует схожим путем, однако остается на несколько шагов позади. Точно так же, как поведение вещества указывает на атомарность его структуры, некоторые свойства пространства-времени предполагают наличие у него своего рода ячеистой структуры — мозаики «атомов» пространства-времени, а быть может, и иного результата не имеющей аналогов филигранной работы. Атомы являются неделимыми «кирпичиками» химических соединений. Аналогично, предполагаемые «атомы» пространства должны быть элементарными единицами длины: их раз-

мер должен быть порядка 10^{-35} метра, что гораздо меньше величины, различаемой на самых мощных современных приборах, — 10^{-18} м. Следовательно, у ученых возникает вопрос, может ли вообще считаться научной гипотеза об «атомарности» пространства-времени? Раз появившаяся гипотеза требовала проверки, то некоторые исследователи приступили к поиску возможностей обнаружения структуры пространства-времени косвенными методами.

Наиболее перспективные пути такого поиска — с помощью астрономических наблюдений. Если мы представим себе обращение расширения Вселенной обратно во времени, наблюдаемые галактики сожмутся в бесконечно малую область — сингулярность Большого взрыва. В данной точке, как предсказывает общепринятая теория гравитации Эйнштейна, Вселенная обладает бесконечно большой плотностью и температурой. Эту точку считают началом Вселенной — рождением вещества, пространства и времени. Однако такая интерпретация заходит слишком далеко, поскольку расхожимость физических характеристик указывает

на неприменимость на таких масштабах теории относительности. Для понимания того, что же происходило в эпоху Большого взрыва, необходимо преступить границы теории относительности и создать теорию квантовой гравитации, которая смогла бы выявить структуру пространства-времени на тех масштабах и энергиях, где теория относительности уже бессильна.

Детали рельефа пространства-времени зависят от плотности ранней Вселенной. В современной Вселенной следы такой структуры проявляют себя в расположении материи и излучения. Короче говоря, если и существует «атомарность» пространства-времени, то не потребуются многовековых поисков ее следов, как в случае нахождения структуры вещества. При удачном стечении обстоятельств мы сможем прояснить этот вопрос уже в грядущем десятилетии.

Кусочки пространства

Физики разработали несколько вариантов квантовой теории гравитации, каждый из которых по-своему вводил квантовые принципы в теорию относительности. Работа автора была посвящена теории так называемой петлевой квантовой гравитации (или, для краткости, просто петлевой гравитации), которая была развита в 1990-х гг. в два этапа. Прежде всего, теоретики математически переформулировали теорию относительности

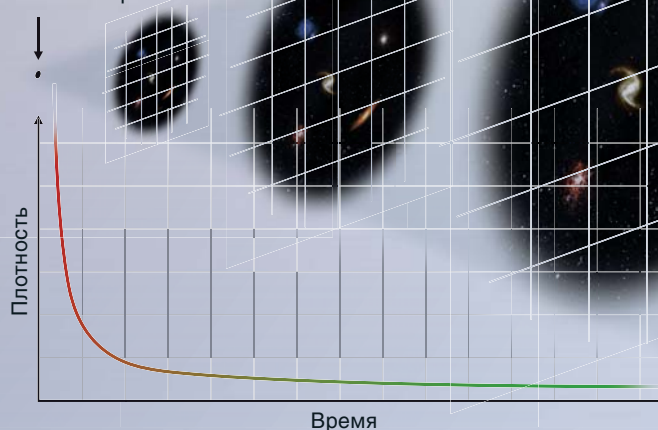
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Общая теория относительности Эйнштейна гласит, что началом Вселенной была сингулярность Большого взрыва, когда вся видимая нами материя была сконцентрирована в одной точке бесконечной плотности. Но теория не учитывает возможность существования некой тонкой квантовой структуры пространства-времени, которая ограничивает степень концентрации вещества и указывает, насколько сильной может оказаться гравитация. Для понимания истинной картины необходима квантовая теория гравитации.
- Согласно предсказаниям одного из претендентов на место такой теории, петлевой квантовой гравитации, пространство-время состоит из «атомов» и обладает ограниченной возможностью вмещать в себя материю и энергию, не давая, таким образом, образовываться сингулярности.
- Если это так, то время может простираться и дальше Большого взрыва. Вселенная до Большого взрыва могла подвергнуться катастрофическому сжатию, который достиг максимально возможной величины, а затем обратился в расширение. Короче говоря, так называемое Большое схлопывание могло привести к Большому отскоку, а потом к Большому взрыву.

ПРОБЛЕМА ТЕОРИИ

Гипотеза о существовании Большого взрыва следует из простого наблюдательного факта: галактики во Вселенной разлетаются друг от друга. Если вы повернете направление их движения назад во времени, то все галактики (или их предшественники), с необходимостью должны были бы сжаться в точку 13,7 млрд лет назад. Фактически, согласно общей теории относительности Эйнштейна, все галактики должны сжаться в единую точку бесконечной плотности — сингулярность Большого взрыва. Но бесконечная плотность не является физической, а раз теория относительности ее предсказывает, то это сигнал к тому, что теория не полна

Сингулярность
Большого взрыва



с целью сделать ее формализм схожим с классической теорией электромагнетизма; давшие свое имя новой теории петли — аналоги линий электромагнитного поля. Далее, следуя некоторым стандартным процедурам (некоторые из них сродни математическому разделу топологии — теории узлов), ученые применили к петлям квантовые принципы. Полученная таким образом квантовая теория гравитации предсказывает существование «атомов» пространства-времени (см.: Смолин Л. *Атомы пространства и времени* // ВМН, № 4, 2004).

Другие подходы, например теория струн и так называемые причинно-динамические разбиения, сами по себе не предсказывают существование таких элементарных «кирпичиков» пространства-времени, но предлагают другие

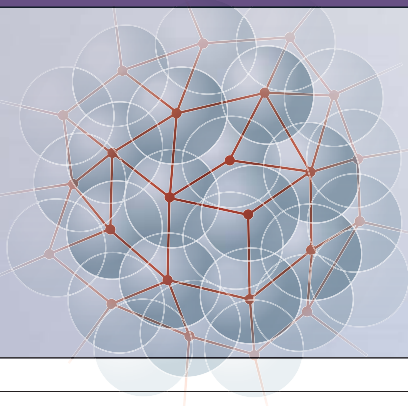
способы объяснения неделимости достаточно малых расстояний (см.: Берджесс К., Кеведо Ф. *Большое космическое путешествие по американским горкам* // ВМН, № 3, 2008, Амьорн Я, Лолл Р., Юркевич Е. *Самоорганизующаяся квантовая вселенная* // ВМН, № 10, 2008). Различия в этих теориях породили полемику, но, по мнению автора, теоретики не столько противоречат один другому, сколько дополняют друг друга. Например, теория струн очень полезна для формирования единого взгляда на взаимодействие частиц, включая гравитацию, в том режиме, когда она не слишком сильна. Но если задаться целью различить, что происходит в сингулярности, в области сильной гравитации, то более пригодными становятся атомарные построения петлевой гравитации.

Мощь теории, изучающей пространство-время, измеряется ее способностью выявлять все изгибы такого пространства-времени. Великим прозрением Эйнштейна было осознание того факта, что пространство-время не является застывшей сценой, на которой разворачивается драма Вселенной. Такая сцена тоже актриса — она не только определяет движение тел во Вселенной, но эволюционирует и сама. Материя, пространство и время взаимодействуют между собой, пространство может расти и сжиматься.

Петлевая гравитация распространяет идею Эйнштейна на квантовый мир. Эта теория пользуется нашим представлением о частицах и веществе и применяет его к элементарным структурам пространства-времени, порождая единый взгляд на базовые концепции физики. Так, квантовая теория электромагнетизма описывает вакуум, лишенный частиц, например фотонов. При увеличении энергии вакуума происходит рождение новой частицы. По аналогии, в квантовой теории гравитации «вакуум» есть отсутствие пространства-времени — совершенное «ничто», которое мы вряд ли можем себе представить. Квантовая гравитация описывает, как увеличение энергии, добавленное к такому «вакууму», порождает новый «атом» пространства-времени.

АТОМЫ ПРОСТРАНСТВА

Теория относительности сталкивается с проблемами, потому что предполагает пространство непрерывным. Более изощренная теория, такая как петлевая квантовая гравитация, полагает, что пространство есть решетка из крошечных «атомов» (сферы). Диаметр таких «атомов» (линии) — так называемая планковская длина, расстояние, на котором гравитационные и квантовые эффекты сравнимы по силе



«Атомы» пространства-времени формируют плотную, постоянно меняющуюся ячеистую сеть. На больших масштабах ее динамика подчиняется законам теории относительности, при обычных условиях мы никогда бы не узнали о существовании подобной атомарной структуры — ячейки настолько малы, что пространство-время выглядит непрерывным. Но если пространство-время обладает энергией, сравнимой с энергией Большого взрыва, структура пространства-времени становится дискретной, и предсказания петлевой гравитации отличаются от предсказаний теории относительности.

Влекомый к отталкиванию

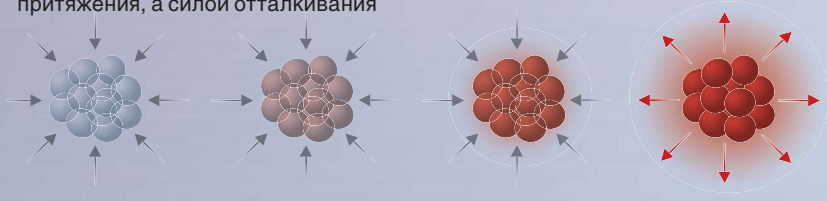
Приложение теории к реальному миру — это сверхсложная задача, поэтому автор с коллегами использовали упрощенные версии, в которых были учтены только действительно существенные особенности Вселенной, такие как ее размер, и были проигнорированы менее важные детали. Коллективу авторов пришлось приспособить для собственных нужд многие стандартные математические процедуры, используемые в физике и космологии. Например, физики-теоретики для описания устройства мира, как правило, пользуются аппаратом дифференциальных уравнений. Эти уравнения точно определяют темп изменения физических переменных, таких, например, как плотность, в каждой точке непрерывного пространства-времени. Но если пространство-время обладает ячеистой структурой, то необходимо использовать так называемые разностные уравнения, решения которых разбивают континуум на дискретные интервалы. Такие уравнения дают описание того, как Вселенная, образно выражаясь, «взбирается по лестнице масштабов», т.е. увеличивает свои размеры. Когда автор в 1999 г. собрался проанализировать космологические следствия петлевой гравитации, многие исследователи ожидали, что упомянутые разностные уравнения смо-

ВЫГЛЯДЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ОТТАЛКИВАЮЩЕЙ

Если вы упакуете энергию в некоторый элемент объема пространства, то длина волны частиц, обладающих этой энергией, уменьшится и в конечном счете приблизится к размеру «атома» пространства-времени



Пространство буквально вываливается из всех окон — если вы попытаетесь упаковать больше энергии, пространство просто «вытолкнет» ее. Оказывается, что гравитация, генерируемая такой областью, становится уже не силой притяжения, а силой отталкивания



гут всего лишь воспроизвести старые результаты. Однако данный математический аппарат сразу же предоставил неожиданные возможности.

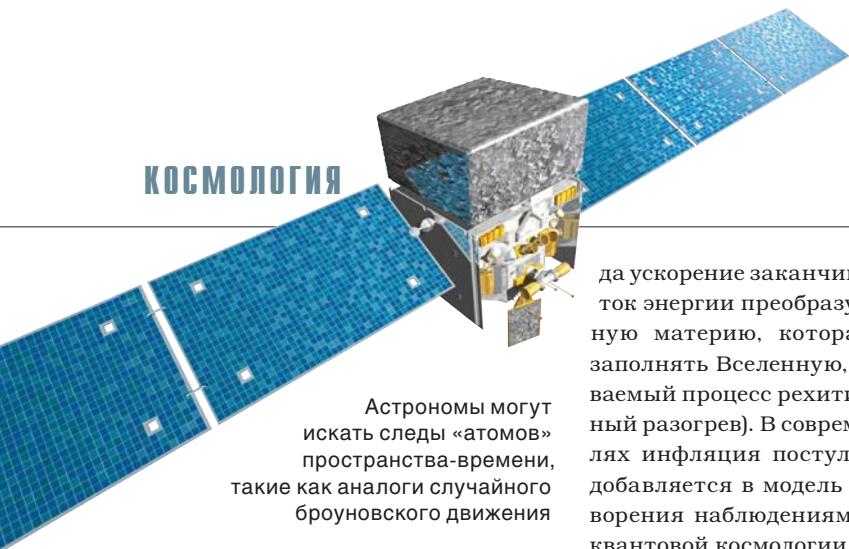
Гравитация — это сила притяжения. Сгусток вещества стремится сжаться под воздействием собственного веса, и если его масса достаточно велика, то гравитация доминирует над всеми остальными взаимодействиями и сжимает вещество до состояния сингулярности, подобно той, что находится в центре черной дыры. Однако согласно петлевой гравитации атомарная структура пространства-времени меняет природу силы притяжения в условиях больших плотностей и сверхвысоких энергий, делая ее силой... отталкивания. Прибегнем к аналогии. Представьте себе пространство, подобное губке, а массу и энергию — насыщающей

его водой. Пористая структура губки позволяет задерживать влагу, но не больше определенного количества. Полностью мокрая губка не может больше впитывать жидкость, а может только изливать ее обратно. Похожим образом, по мнению автора, обстоит дело и в атомарном квантовом мире, обладающем пористой структурой и могущем принять только некоторое количество энергии. Когда плотность энергии становится слишком большой, начинают работать силы отталкивания. В противоположность такому подходу непрерывное пространство-время в теории относительности может содержать безграничное количество энергии.

За счет гравитационно-квантовых изменений в балансе сил в теории петлевой гравитации никогда не возникают сингулярности, т.е. нет состояний с бесконечно боль-

ОБ АВТОРЕ

Мартин Боджовальд (Martin Bojowald) — ведущий научный сотрудник Института гравитации и космоса в Университете штата Пенсильвания. Область научных интересов — петлевая квантовая гравитация в космологии. Лауреат премий по гравитации и теории относительности. Увлекается чтением классической литературы и бегом на длинные дистанции.



Астрономы могут искать следы «атомов» пространства-времени, такие как аналоги случайного броуновского движения

шой плотностью. Согласно такой модели, вещество в ранней Вселенной обладало очень большой, но конечной плотностью, эквивалентной тысяче миллиардов солнц в каждом объеме радиуса протона. При таких условиях гравитация действовала как сила отталкивания, приводя к расширению пространства; с уменьшением же плотности гравитационные силы приобрели хорошо известный нам вид сил притяжения.

В сущности, отталкивающая гравитация послужила причиной ускоренного расширения Вселенной. По всей видимости, космологические наблюдения требуют наличия в ранней Вселенной такого ускорения, известного как космологическая инфляция. С расширением Вселенной силы, управляющие инфляцией, медленно спадают. Когда

ускорение заканчивается, избыток энергии преобразуется в обычную материю, которая начинает заполнять Вселенную, — так называемый процесс рехитинга (вторичный разогрев). В современных моделях инфляция постулируется, т.е. добавляется в модель для удовлетворения наблюдениям. В петлевой квантовой космологии инфляция — естественное следствие атомарности пространства-времени. Ускорение появляется, когда Вселенная мала, и ячеистая структура пространства-времени все еще значима.

Время до начала времен

В отсутствие сингулярности, дающей начало времени, история Вселенной может быть продлена гораздо дальше в прошлое, чем это могут считать возможным космологи. Некоторые специалисты в смежных разделах физики пришли к таким же выводам (см.: *Венециано Г. Миф о начале времен // ВМН, № 2, 2004*), но только очень немногие создали модели, полностью решающие проблему сингулярности. Большая их часть, включая полученные из струнных теорий, требуют предположений о том, что могло бы случиться

в этой тревожащей умы исследователей точке. Петлевая гравитация в противоположность остальным подходам без дополнительных постулатов способна отследить, что происходило в сингулярности. Модели, основанные на этой теории, хотя и упрощенные, по общему признанию, базируются на общих принципах, избегая новых постулируемых сущностей.

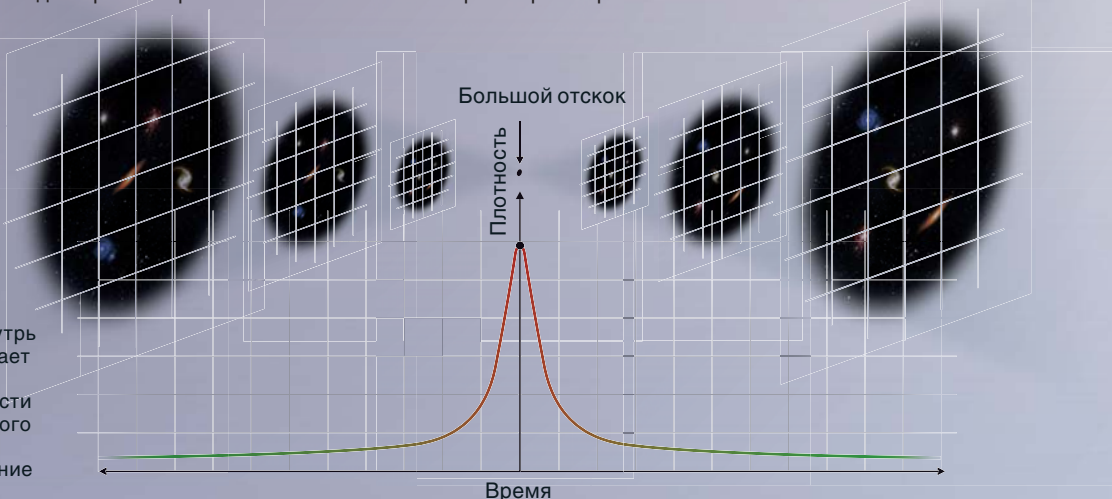
Используя разностные уравнения, авторы могут реконструировать далекое прошлое. Один из возможных сценариев развития Вселенной следующий: начальное состояние, обладавшее высокой плотностью, появляется, когда некая существовавшая раньше вселенная коллапсирует под действием гравитационных сил притяжения. Плотность увеличивается до такой степени, что гравитация «переключается», становясь силой отталкивания, и вселенная начинает расширяться снова. Такой процесс получил название отскока. Первая досконально изученная модель отскока — идеализированный случай вселенной высокой степени симметрии и содержащей только один тип материи. Частицы в такой модели предполагаются безмассовыми и не

ВМЕСТО БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

Определяя ограничения на максимальное количество энергии, которое может быть «упаковано» в пространстве, петлевая квантовая гравитация вместо сингулярности Большого взрыва вводит в рассмотрение так называемый

Большой отскок — процесс, который выглядит как начало чего-то, но на самом деле отражает переход из некоего предыдущего состояния. Большой отскок может объяснить расширение ранней Вселенной

В одном из сценариев Вселенная вечна. В результате направленного внутрь взрыва она достигает максимальной плотности (на границе Большого отскока) и снова начинает расширение



взаимодействующими друг с другом. Хотя эта модель и была крайне упрощенной, она с самого начала потребовала больших объемов численного моделирования, завершеного только к 2006 г. Эбхеем Аштекар (Abhay Ashtekar), Томашем Павловски (Tomasz Pawłowski) и Парампритом Сингхом (Parampreet Singh) из Университета штата Пенсильвания. Они рассмотрели распространение волн, представляющих вселенную, до и после Большого взрыва. Проведенное моделирование ясно показало, что волны могли бы и не следовать классической траектории, ведущей в пасть сингулярности, но могли бы остановиться и развернуться назад при наличии отталкивающих гравитационно-квантовых сил.

Впечатляющий результат проведенного моделирования — то, что хорошо известный принцип неопределенности квантовой механики, по всей видимости, не давал о себе знать во время отскока. Другими словами, волна осталась локализованной, а не рассеивалась, как это обычно происходит в квантовой механике. Если принять это за чистую монету, то получается, что вселенная до отскока

ЗЕРКАЛО, ЗЕРКАЛО

Несмотря на эффекты, в результате которых Вселенная перемешивается во время Большого отскока, физики могут сформулировать несколько полезных гипотез о том, что было «до». Кое-что действительно оказывается странным. Так, использование разностных уравнений в петлевой квантовой гравитации подразумевает, что область пространства-времени, предшествующая Большому отскоку, была зеркальным отображением пространства-времени нашей Вселенной. Таким образом, например, то, что было предназначено для правой руки, окажется предназначенным для левой и наоборот.

Для визуализации этого эффекта представьте себе сдувающийся воздушный шарик, который вместо того, чтобы превратиться в мягкий кусочек резины, сохраняет свою энергию и момент вращения. Резиновый шарик, вовлеченный в движение, будет оставаться в движении. Так, если он сожмется до минимального размера, то вывернется наизнанку и снова начнет раздуваться — что прежде было внутри шарика, теперь окажется снаружи и наоборот. Схожим образом, когда «атомы» пространства-времени пересекают друг друга во время Большого отскока, Вселенная выворачивается наизнанку.



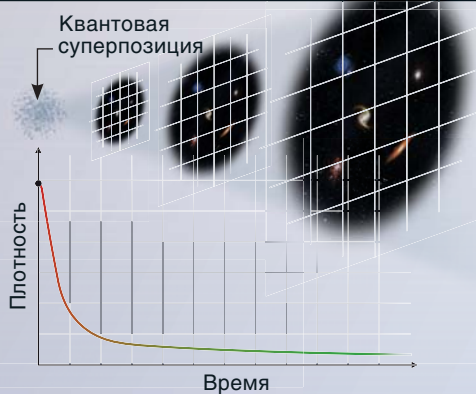
Такая инверсия интересна тем, что элементарные частицы не строго зеркально симметричны — некоторые процессы меняются при изменении ориентации. Асимметрия должна быть учтена для понимания поведения материи на границе Большого отскока.

была похожа на нашу Вселенную. Такая вселенная была управляема теорией относительности и, возможно, наполнена звездами и галактиками. Если так, то мы могли бы экстраполировать нашу Вселенную назад во времени, через отскок, и понять, что же происходило раньше, подобно тому, как мы можем воссоздать траектории двух бильярдных шаров до столкновения, основываясь на их движении после него — нам нет необходимости знать детали столкновения на уровне атомов.

К сожалению, последующий более глубокий анализ этой модели, проделанный автором, развеял появившуюся надежду. Так же, как и используемые в численных расчетах квантовые волны, первая модель оказалась специальным случаем. В общем же автор нашел, что волны все-таки рассеиваются, квантовые эффекты достаточно сильны, и их

необходимо принимать во внимание. Таким образом, отскок не был простым толчком силы отталкивания, подобно тому, как это происходит при столкновении двух бильярдных шаров. Вместо этого ситуация может представлять собой появление нашей Вселенной из практически неизмеримого квантового состояния — мира в сильно флуктуирующем беспорядке. Даже если существовавшая ранее вселенная была очень похожа на нашу Вселенную, то она прошла сквозь протяженный период сильной флуктуации плотности энергии и материи, и все оказалось перемешано случайным образом.

Флуктуации до и после Большого взрыва не были сильно связаны друг с другом. Вселенная до Большого взрыва могла флуктуировать совершенно по-другому, чем это происходило после. Детали данных флуктуаций не пережили



Можно предложить еще одну альтернативную теорию, отличающуюся и от классической гипотезы Большого взрыва, и от теории Большого отскока. До Большого отскока Вселенная могла находиться в практически неизмеримом квантовом состоянии, не являющимся пространством как таковым, когда что-то послужило толчком к Большому отскоку и к формированию «атомов» пространства-времени. Какая из альтернативных теорий верна — покажет изучение дальнейших деталей эволюции Вселенной, над которыми физики продолжают работать

отскок. Короче говоря, наша Вселенная обладает трагической забывчивостью — она могла существовать до Большого взрыва, но квантовые эффекты во время отскока стерли практически все следы ее предыстории.

Вселенная обладает трагической забывчивостью — она могла существовать до Большого взрыва, но квантовые эффекты во время отскока стерли практически все следы ее предыстории

Остатки памяти

Предъявленная автором картина Большого взрыва более хитроумна, чем классический взгляд на сингулярность: тогда как в теории относительности происходит падение в сингулярность, петлевая квантовая гравитация в состоянии регулировать такие экстремальные состояния. В этой теории Большой взрыв больше не представляет собой физическое начало и математическую сингулярность, но он, тем не менее, ставит практическое ограничение нашему познанию — по-прежнему не существует полного понимания картины того, что было до него.

Этот факт может быть огорчительным, но может оказаться и своего рода концептуальным благословием! В физических системах в повседневной жизни беспорядок склонен нарастать. Этот принцип, известный как второй закон термодинамики, является аргументом против модели вечной Вселенной. Так, если бы порядок убывал на бесконечном промежутке времени (в прошлом), то к настоящему моменту Вселенная оказалась бы настолько хаотичной, что упорядоченные структуры, которые мы наблюдаем в галактиках и на Земле, просто не могли бы существовать. Знание точной степени «забывчивости» Вселенной может помочь для описания молодой, растущей Вселенной, обладающей неким «числом состоянием», безотносительно

всего того беспорядка, что был до Большого взрыва.

Согласно классической термодинамике, не существует такого понятия, как «чистое состояние» — любая система всегда хранит память о своем прошлом в конфигу-

рации своих атомов (см.: Кэрролл Ш. *Космологическое происхождение «стрелы времени»* // ВМН, № 9, 2008). Однако давая возможность количеству «атомов» пространства-времени меняться, петлевая квантовая гравитация предоставляет Вселенной больше степеней свободы для упорядочивания, чем в классической физике.

Все сказанное не означает, что космологи отчаялись исследовать гравитационно-квантовый период развития нашей Вселенной. Поиск гравитационных волн и исследование нейтрино — исключительно многообещающие методы, поскольку и те, и другие слабо взаимодействуют с веществом и, следовательно, проникают в первичную плазму с минимальными потерями. Эти «вестники» смогли бы хорошо донести до нас сведения из времен Большого взрыва и, быть может, даже из более далеких эпох.

Один из способов поиска гравитационных волн — изучение их «отпечатков» на микроволновом реликтовом излучении. Если космологическая инфляция была порождена квантово-гравитационными силами отталкивания, то с помощью наблюдений анизотропии реликтового излучения можно было бы обнаружить намеки на следствия такой теории. Теоретики обязаны также определить, сможет ли этот новый кандидат на роль источника инфляции воспроизвести другие наблюдательные космологические эф-

фекты, особенно в распределении плотности ранней Вселенной, видимой по данным анизотропии реликтового излучения.

В то же время астрономы могут искать пространственно-временные аналоги случайного броуновского движения. Например, квантовые флуктуации пространства-времени могли бы влиять на распространение света на больших расстояниях. Согласно петлевой гравитации, волна света не может быть непрерывной: она обязана быть «подогнанной» под размеры (кратной размерам) элементарной ячейки пространства-времени. Чем меньше длина волны, тем больше пространственно-временная решетка деформирует ее. Как следствие, свет разных длин волн идет с разной скоростью. Хотя это различие ничтожно, оно может накапливаться, когда свет проходит очень большие расстояния. Удаленные источники, такие как гамма-вспышки — один из лучших способов найти подтверждения подобным теориям. (см.: Атвуд У., Майкельсон П., Риппи С. *Окно в экстремальную вселенную* // ВМН, № 3, 2008).

В случае атомов вещества 25 веков прошло между спекулятивными предположениями античных философов и анализом броуновского движения Эйнштейном, который сделал атомы реальным субъектом экспериментальной науки. Для «атомов» пространства-времени задержка не должна оказаться такой большой. ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Quantum gravity. Carlo Rovelli. Cambridge University Press, 2004.
- What happened before the Big Bang? Martin Bojowald in *Nature Physics*, Vol. 3, No. 8, pages 523-525; August 2007.
- Loop Quantum Cosmology. Martin Bojowald in *Living Reviews in Relativity*, Vol. 11, No. 4; July 2, 2008. Available at <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2008-4>

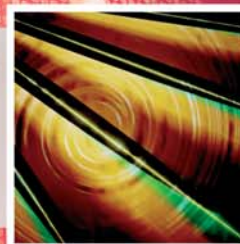
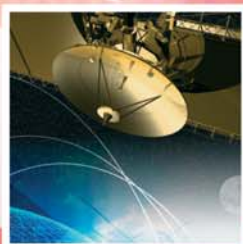


IX МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ САЛОН ИННОВАЦИЙ И ИНВЕСТИЦИЙ

3-6 марта
2009 года



Москва, ВВЦ, Международный выставочный комплекс, выставочная зона 2



«НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРИОРИТЕТЫ РАЗВИТИЯ РОССИИ: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ИННОВАЦИИ»

Организаторы:

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по науке и инновациям
Правительство Москвы

Московский международный салон инноваций и инвестиций является крупнейшим в России выставочным мероприятием в научно-технической и инновационных сферах, объединяющим изобретателей, разработчиков и производителей высокотехнологичной продукции.

Тематические разделы Салона:

- Нанотехнологии и наноматериалы
- Живые системы
- Информационно-телекоммуникационные системы
- Рациональное природопользование
- Энергетика и энергосбережение
- Межгосударственное сотрудничество в инновационной сфере
- Услуги в области инновационной деятельности

КОНТАКТНЫЕ ТЕЛЕФОНЫ:

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ

Тел./факс: (495) 629-24-84, 629-03-88
E-mail: tgor@fasi.gov.ru, sobol@fasi.gov.ru

ОАО «ГАО ВВЦ»

Тел./факс: (495) 981-92-52, 544-34-47 доб. 2849
E-mail: nataly@Vvcentre.ru, l_elen@Vvcentre.ru

ФГУ НИИ РИНКЦЭ

Тел.: (499) 256-05-63, 259-86-46
E-mail: gagarin@extech.ru, yulkhin@yandex.ru

www.innovex.ru

www.fasi.gov.ru

www.extech.ru