



Могут ли Большой взрыв
и вся порожденная им Вселенная
оказаться голографическим миражом,
пришедшим из другого измерения?



Нияеш Афшорди,
Роберт Манн и Рази Пурхасан

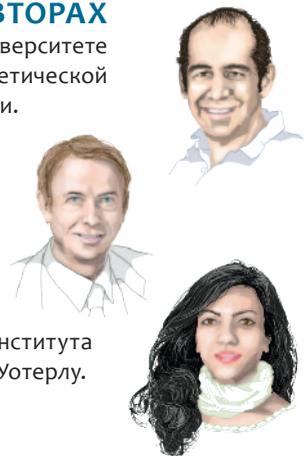
Черная дыра в начале времен

ОБ АВТОРАХ

Нияеш Афшорди (Niayesh Afshordi) — доцент кафедры физики и астрономии в Университете Уотерлу и адъюнкт-преподаватель по космологии и гравитации в Институте теоретической физики Периметр, исследователь в области астрофизики, космологии и гравитации.

Роберт Манн (Robert B. Mann) — профессор и бывший руководитель физики и астрономии в Университете Уотерлу, постоянный сотрудник Института теоретической физики Периметр, бывший президент Канадской ассоциации физиков. Область научных интересов: черные дыры, квантовая информация.

Рази Пурхасан (Razieh Pourhasan) — студентка Института теоретической физики Периметр и Университета Уотерлу.



В

известной аллегории о пещере великий греческий философ Платон говорил об узниках, на всю жизнь прикованных к стене темной пещеры. Позади несчастных вечно горело пламя, а между ними и пламенем двигались объекты, отбрасывая тени на стену, там, где заключенные могли их видеть. Плоские тени — единственная реальность, доступная тем людям. Их кандалы мешали воспринимать истинный мир — царство еще одного измерения, дарящего объем.

Познай узники законы трехмерного мира — и они разом смогли бы объяснить происхождение и смысл смутных теней, мелькающих перед ними на стене. Мысль Платона была поразительно глубока.

Быть может, мы все тоже живем в гигантской космической пещере, появившейся в первые минуты существования Вселенной. В рамках общепризнанной теории наш мир родился в результате Большого взрыва из точки бесконечной плотности. Однако, согласно последним достижениям в области теоретической космологии, удастся «отодвинуть» рождение Вселенной за момент Большого взрыва, в ту эру, когда могли существовать дополнительные измерения пространства-времени. Эта многомерная протовселенная могла оставить следы в нашем мире, которые астрономы в принципе могут обнаружить.

Наша Вселенная трехмерна в пространстве и одномерна во времени — это называется «трехмерная Вселенная». Как и в притче великого философа, наблюдаемая Вселенная может оказаться всего лишь тенью — проекцией — мира четырех пространственных измерений. Так, вся наша Вселенная могла бы родиться в результате имплозии (взрыва, направленного внутрь) какой-нибудь звезды из четырехмерной протовселенной. Такой взрыв мог бы породить трехмерную оболочку вокруг четырехмерной черной дыры. Наша Вселенная и есть эта трехмерная оболочка.

! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Космология может дать точное описание всех этапов эволюции нашей Вселенной, начиная от нескольких минут после рождения и заканчивая современным моментом. Однако остается ряд фундаментальных вопросов, требующих ответов.
- Одна из таких загадок — природа Большого взрыва, сингулярной точки бесконечной плотности, в которой нарушаются законы физики.
- Существует возможность объяснить происхождение Большого взрыва с помощью многомерных пространств: четырехмерная звезда, коллапсируя в черную дыру, могла бы породить наш трехмерный мир. Такая теория позволяет ответить на некоторые неразрешенные космологические вопросы не только теоретически, но, возможно, и с привлечением методов наблюдательной астрономии.



БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ: сверхмощный взрыв звезды может породить черную дыру и облако газа и пыли, называемые остатками взрыва сверхновой (отмечено слева красным цветом). Во Вселенной, обладающей более высокой размерностью пространства, подобный взрыв может породить наш трехмерный мир.

Что дает ученым право выдвигать такую, казалось бы, абсурдную гипотезу? На то есть две причины. Во-первых, такой вывод с необходимостью следует из математических расчетов. А математика — единственная наука, точно описывающая пространство и время.

За последние несколько десятилетий получила развитие так называемая голографическая теория, которая позволяет сводить описание событий в одном измерении к процессам, происходящим в пространствах более высоких размерностей. Например, ученые могут найти решение относительно несложных уравнений динамики жидкости в двух измерениях, а потом использовать эти решения для понимания аналогичных процессов в более сложных системах — например, для описания трехмерной черной дыры. С точки зрения математики обе системы эквивалентны, жидкость служит точным аналогом модели черной дыры.

Успех голографического подхода убедил многих ученых в том, что он не есть всего лишь некое математическое преобразование. Для многих задач этот подход обладает физическим смыслом. Возможно, границы между пространственными измерениями не так устойчивы, как это полагали до сих пор. Возможно, физические законы справедливы для миров других размерностей и переведены в наш трехмерный мир. Вероятно, как и у платоновских узников, наши чувства обманули нас, в то время как понимание истинной природы вещей содержится в недоступном нам четвертом пространственном измерении.

Вторая причина полагать, что наша Вселенная может оказаться четырехмерной, заключается в том, что в рамках этой гипотезы можно объяснить причину рождения и расширения нашего мира. Началом Вселенной был Большой взрыв, после которого — согласно представлениям современной космологии — почти мгновенно последовала стадия инфляции. Инфляция — это экспоненциальное расширение пространства, в результате чего ранняя Вселенная увеличила свой объем на многие сотни порядков. Однако до сих пор не ясно, что послужило причиной самого Большого взрыва и каков источник инфляционного поля. В модели четырехмерной Вселенной можно получить ответ на эти вопросы и понять, откуда взялась наша Вселенная.

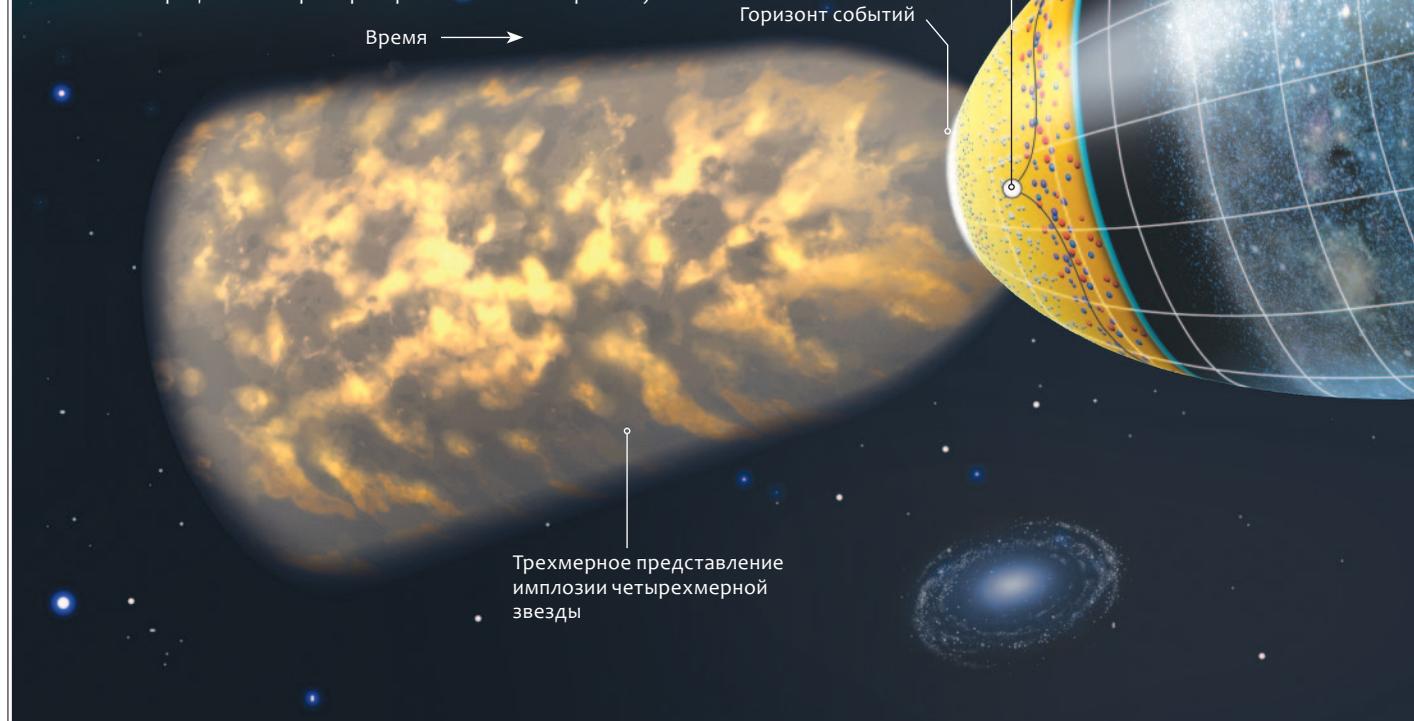
Знакомый и незнакомый космос

Попытки начать изучение свойств четырехмерной Вселенной родились из-за трудностей, с которыми пришлось столкнуться при работе с трехмерной моделью. Современная космология поразительно успешна, но ее достижения таят глубочайшие загадки, которые, возможно, найдут свое объяснение с помощью голографического принципа.

Уравнения Фридмана и небольшое число независимых параметров дают описание всей истории Вселенной — от современного момента времени до одной секунды с момента Большого взрыва, последовательно, детально и шаг за шагом. Эти параметры включают плотность

ДО БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

Согласно стандартным представлениям, Большой взрыв начался с сингулярности, точки бесконечно большой плотности, которая породила всю Вселенную. Сингулярности непредсказуемы, поскольку в них нарушаются физические законы. Нет никаких причин предполагать, что из сингулярности обязательно должен сформироваться именно тот мир, который мы наблюдаем. Можно предложить теорию, в которой сингулярность Большого взрыва не окажет своего непредсказуемого воздействия на рождающуюся Вселенную, она будет скрытой многомерным аналогом горизонта событий. Наш мир родился, когда четырехмерная звезда в объемлющем четырехмерном пространстве сжалась в черную дыру. На рисунке показан процесс коллапса (в трех измерениях, поскольку трудно себе представить такой процесс в четырех пространственных измерениях).



обычной (барионной) материи, плотности темной материи и темной энергии, а также амплитуду и характерные особенности квантовых флуктуаций ранней Вселенной. Такая модель, называемая стандартной космологической моделью с темной энергией в форме «лямбда-члена», описывает сотни, если не тысячи точек, полученных по результатам наблюдений, покрывая шкалы от 1 млн до 10 млрд световых лет, что соответствует возрасту нашей Вселенной. Однако такой успех наблюдательной космологии не означает, что изучение космоса полностью завершено. В нашем понимании истории Вселенной есть пробелы. Ученые вплотную подошли к проблеме возникновения нашего мира, и пока эта задача оказалась не по силам.

Проблема 1: мы не понимаем, почему космологические параметры именно такие, какие они есть. Рассмотрим плотность вещества и энергии во Вселенной. Всего несколько десятилетий назад астрономы полагали, что обычная материя (элементы, составляющие таблицу Менделеева) — преобладающая форма

массы и энергии. Космологические наблюдения заставили радикально пересмотреть эту концепцию. Сейчас ученым известно, что плотность обычной материи составляет примерно 5% от общей плотности Вселенной, 25% приходится на темную материю неизвестного состава, которая проявляет себя только в гравитационных взаимодействиях. Наконец, почти 70% полной массы Вселенной заключено в темной энергии, неизвестном поле, которое заставляет нашу Вселенную расширяться ускоренно (а не замедленно, как это ожидалось бы при наличии только гравитационного притяжения). Почему во Вселенной существуют темная материя и темная энергия и почему их соотношение именно таково? «Это науке не известно, наука еще пока не в курсе дела».

Возможно, понимание появится, если будут лучше известны детали Большого взрыва. Трудно вообразить, как наполненный излучением и частицами плазменный шар ранней Вселенной при температурах выше 10^{27} градусов смог, расширяясь, породить то, что мы наблюдаем



Представление на двумерной поверхности (одно измерение для наглядности редуцировано) нашей трехмерной Вселенной

подтвердили, что наша Вселенная трехмерно плоская и однородная с большой точностью, что и предсказывает инфляционная модель. Кроме того, наблюдаемые характеристики первичных флуктуаций плотности таковы, что инфляционное расширение с необходимостью приводит к современной картине космоса.

Проблема 2: мы не понимаем, что такое инфляция. Вы можете спросить, что управляет инфляцией, которая обладает огромной энергией. Ученые полагают, что вскоре после Большого взрыва Вселенная была наполнена полем гипотетической частицы инфлатона. Бозон Хиггса, частица, недавно обнаруженная на Большом адронном коллайдере в *CERN*, обладает свойствами, во многом схожими с инфлатоном, и может даже играть его роль. Инфлатон должен быть ответственным как за ускоренное расширение ранней Вселенной, так и за формирование крупномасштабной структуры Вселенной, потому что единственная причина контраста плотности в ранней Вселенной — это квантовые флуктуации инфлатонного поля.

Инфляция до сих пор не решила некоторые проблемы — она всего лишь отодвинула их. Мы не знаем свойств инфлатона и откуда он взялся. Не знаем, как его обнаружить. И не уверены, что он вообще существует.

Кроме того, физики не понимают, каким образом инфляционная стадия

сегодня, — практически однородный и пространственно плоский космос с постоянной температурой всего в несколько градусов.

Космологическая инфляция — одна из лучших теорий, объясняющих однородную структуру Вселенной на сверхбольших масштабах. Стремительное инфляционное расширение ранней Вселенной «разгладило» пространство и привело почти к постоянной температуре повсюду в космосе. Как своеобразная космическая лупа, инфляция растянула крохотные квантовые флуктуации плотности энергии до космологических масштабов. Эти флуктуации послужили основой формирования структур в космосе: галактик, звезд, планет, а последнее помогло зарождению живых организмов.

Инфляция признана успешной парадигмой. Десятилетиями космологи находили все новые наблюдательные подтверждения теории инфляции — наблюдательные данные микроволнового реликтового излучения, «запись» флуктуаций плотности ранней Вселенной. Последние наблюдения космического радиотелескопа *Planck*

завершилась, т.е. каким образом наша Вселенная вышла из этой стадии. Если некоторое поле, обладающее энергией, управляло экспоненциальным расширением Вселенной, то что же принудило его вдруг «выключиться»? У нас нет и удовлетворительного объяснения происхождения основных параметров стандартной космологической модели, отдельные из которых должны быть поразительно точно выверены, чтобы удовлетворять наблюдательным данным. И, наконец, нет описания Вселенной до инфляционной стадии — первых миллиардных от миллиардных долей секунды после Большого взрыва.

Проблема 3: мы не понимаем, как все началось. Большая проблема космологии — понимание Большого взрыва как внезапного вынужденного появления пространства и времени из обладающей бесконечной плотностью точки, называемой сингулярностью. Сингулярность — очень странный объект. Фактически это математическая точка, где пространство и время искривлены настолько сильно, что становится

ПЕРВЫЕ СИГНАЛЫ ОТ СОТВОРЕНИЯ

Недавно полученные указания на существование космологических гравитационных волн смогут приблизить нас к моменту Большого взрыва



ТЕМНЫЙ ПОЛЮС: телескопы, установленные на Южном полюсе, ищут первые сигналы новорожденной Вселенной

Зима выдалась необычайно холодной, погода стояла ужасная, вторая неделя марта не предвещала ничего нового. Но именно тогда среди космологов появились слухи о готовящемся важнейшем сообщении Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра. Слухи распространялись и в интернет-сообществах. Стали появляться первые подробности. Произошедшее не было рядовым отчетом — это было событие, которое, в случае успешного подтверждения, происходит один раз в жизни. Это событие было долгожданной мечтой космологов, и даже по самым оптимистичным прогнозам оно ожидалось только в ближайшие десятилетия.

В понедельник 17 марта 2014 г. астрофизическая лаборатория BICEP-Кеск, которая состоит из нескольких микроволновых телескопов, размещенных на географическом Южном полюсе, сообщила об открытии следов поляризации особого вида в космическом микроволновом фоне. Если интерпре-

тация этих наблюдений верна, то это открытие может подтвердить важное предсказание теории космологической инфляции. Более 30 лет назад в рамках этой теории было предсказано существование космологических гравитационных волн. В простейшей модели инфляции генерируются гравитационные волны, влияние которых на анизотропию реликтового излучения сравнимо с влиянием флуктуаций плотности. Это открытие могло бы стать первым прямым доказательством квантовой природы гравитации, проблема которой — головоломка теоретической физики прошлого столетия.

В науке, как и в жизни, все устроено далеко не так просто, как кажется на первый взгляд. Например, в простых моделях инфляции, которые предсказывают доступные наблюдениям космологические гравитационные волны, получается, что следы гравитационных волн должны быть видимы в данных космического радиотелескопа *Planck*. Но этого

не происходит! Кроме того, полученные в эксперименте BICEP специфические сигналы поляризации могут, в принципе, быть объяснены и другими причинами — например, наличием пыли в нашей Галактике.

А что может означать открытие космологических гравитационных волн для модели голографического Большого взрыва? В наблюдениях ранней Вселенной ученые ограничены набором данных, иногда даже противоречащих друг другу. Новые — уже полученные, но еще не опубликованные — данные аппарата *Planck* будут представлены в октябре 2014 г., и другие группы, занимающиеся исследованием анизотропии реликтового излучения, также представят результаты обработки своих данных. Воссоздание самых первых мгновений жизни нашей Вселенной — трудная задача. Только время — и, возможно, немного удачи, — позволят нам все-таки понять, как родился наш мир.

невозможным отличить будущее от прошлого. В этой точке нарушаются законы физики. В сингулярной Вселенной нет ни порядка, ни законов. Из сингулярности может зародиться все, что только может логически существовать в дальнейшем. Нет никаких оснований полагать, что сингулярность породила такой упорядоченный мир, какой мы наблюдаем (антропный принцип — один из существующих доводов).

Следовало ожидать, что появление Вселенной из сингулярности было бы невообразимо хаотично и сопровождалось бы огромными перепадами температуры от точки к точке. Кроме того, инфляционная стадия могла бы и не сгладить пространство. В самом деле, если бы начальные возмущения были бы слишком большими, то инфляция могла бы вообще не начаться. Проблема сингулярности не может быть решена одной только теорией инфляции.

Сингулярности — объекты странные, но все же не полностью незнакомые. Они образуются, например, в центрах черных дыр, сверхсжатых остатках гигантских звезд. Все звезды — атомные печи, в которых легкие химические элементы (в основном водород) превращаются в тяжелые элементы. Процесс ядерного синтеза — основа жизни звезды. Когда все топливо в звезде выгорает, ее дальнейшей эволюцией начинает управлять только гравитация. Звезда по крайней мере в десять раз массивнее нашего Солнца должна сжиматься, порождая взрыв сверхновой. Если звезда еще массивнее (15–20 солнечных масс), то после взрыва сверхновой останется плотное ядро, которое продолжит сжиматься, превратившись в сингулярность нулевого размера — черную дыру.

Черную дыру можно представить как некоторую область пространства, из которой не может вырваться даже свет. Скорость света — максимальная скорость, с которой может распространяться любая форма материи. Таким образом, граница черной дыры — двумерная поверхность, называемая горизонтом событий, — это «точка невозврата». Вещество, однажды попавшее за горизонт событий, навсегда становится недоступным в остальной части Вселенной и неотвратимо движется к сингулярности в центре черной дыры.

Так же как и в точке Большого взрыва, в центре черной дыры законы физики нарушаются. Однако имеется важное отличие: сингулярность черной дыры скрыта горизонтом событий, а сингулярность Большого взрыва — нет. Горизонт событий черной дыры играет роль мембраны, позволяющей веществу и излучению проникать под горизонт, но препятствующей их выходу наружу. Эта поверхность служит своеобразным щитом для внешнего наблюдателя, защитой от катастрофических непредсказуемостей сингулярности черной дыры.

Завернутая в горизонт событий, сингулярность бессила нарушить физические законы в наблюдаемом космосе. Издалека черная дыра выглядит просто — это гладкая и однородная структура, параметры которой однозначно задаются только ее массой и угловым моментом (и электрическим зарядом, если он есть). Известно выражение о таком объекте: «черная дыра не имеет волос». Это означает, что у черной дыры нет никаких отличительных черт, кроме массы, углового момента и заряда.

В противоположность описанной картине сингулярность Большого взрыва (в наиболее общепринятом ее понимании) ничем не прикрыта. Про такую сингулярность говорят, что она «голая». У Большого взрыва нет горизонта событий. Хотелось бы иметь способ оградиться от такой сингулярности — возможно, чем-то похожим на горизонт событий.

Можно предложить аналог горизонта — и это превратит Большой взрыв в космический мираж. В теории, основанной на многомерности пространства, сингулярность Большого взрыва удастся скрыть.

Многомерный коллапс

Выполняя сходную функцию, «покрывало» для сингулярности Большого взрыва должно, тем не менее,

существенно отличаться от горизонта событий черной дыры. Поверхность, скрывающая сингулярность Большого взрыва, должна быть не двумерна, а трехмерна, потому что порожденная Большим взрывом Вселенная также трехмерна. Если мы допустим, что эта граница — тоже горизонт событий, образовавшийся в результате коллапса (подобно тому, как двумерный горизонт события черной дыры сформировался в результате коллапса трехмерной звезды), то коллапс должен был происходить в четырехмерном пространстве.

Многомерный сценарий, когда количество пространственных измерений превосходит известные нам на единицу, так же стар, как и сама теория относительности. Впервые эта идея была предложена Теодором Калуцей (Theodor Kaluza) в 1919 г. и расширена Оскаром Клейном (Oskar Klein) в 1920 г. Идея была надолго забыта, почти на полвека, пока вдруг не стала востребованной в струнной теории в 1980-х гг. Недавно старая идея пригодилась снова — для создания космологических моделей «миров на бране».

Все известные формы вещества и энергии сосредоточены в нашем трехмерном мире и, как в мире кино, не могут выйти за пределы плоского экрана. Исключение составляет гравитация, которая может распространяться во всем многомерном балке

Основная идея мира на бране заключается в том, что наша трехмерная Вселенная погружена в пространство большего числа измерений. Тогда трехмерный мир называется «браной», а объемлющее пространство — «балк». Все известные формы вещества и энергии сосредоточены в нашем трехмерном мире и, как в мире кино, не могут выйти за пределы плоского экрана (подобно уже упомянутым теням на стене из притчи Платона). Исключение составляет гравитация, которая может распространяться во всем многомерном балке.

Рассмотрим четырехмерную объемлющую Вселенную, которая могла существовать до Большого взрыва. В ней, как и в нашей Вселенной, могли бы быть звезды и галактики — только уже четырехмерные. И звезды, сжигая топливо, могли бы также обращаться в черные дыры.

На что похожа четырехмерная черная дыра? У нее есть горизонт событий, поверхность «невозвращения», из-под которой не может уйти свет. Но вместо двумерной поверхности, которая образует горизонт событий в трехмерной черной дыре, этот горизонт был бы пространственно трехмерным.

В самом деле, моделируя коллапс четырехмерной черной дыры, при определенных условиях можно получить, что сбрасываемая звездой оболочка образует расширяющуюся трехмерную поверхность, которая содержит внутри себя трехмерный горизонт событий. Наша Вселенная и есть эта трехмерная оболочка, «трибрана» — голограмма коллапса четырехмерной звезды в черную дыру. Сингулярность Большого взрыва оказывается навсегда скрытой от нас трехмерным горизонтом событий.

Несмотря на то что модель голографического Большого взрыва решает ряд фундаментальных космологических проблем, в частности проблему происхождения нашей Вселенной, она порождает ряд своих собственных загадок. Например, откуда взялась прародительница нашей Вселенной?

Насколько это реально?

Рассмотренная выше модель обладает рядом особенностей, в том числе отсутствием голой сингулярности, породившей нашу Вселенную. Решаются ли в этой модели важнейшие проблемы космологии: плоскостность и однородность? Поскольку четырехмерная объемлющая Вселенная могла бы существовать сколь угодно долго в прошлом, то в ней давным-давно должно было установиться температурное равновесие. Балк должен быть достаточно гладким и мог бы передать это свойство и нашей трехмерной Вселенной. Гладкость нашего мира могла бы определяться и «теоремой об отсутствии волос» у четырехмерной черной дыры. Чем больше масса четырехмерной черной дыры, тем более плоской окажется трибрана. Таким образом, плоскостность нашей Вселенной — следствие коллапса очень массивной четырехмерной звезды.

Рассмотренная модель голографического Большого взрыва решает не только основные космологические задачи (плоскостность и однородность Вселенной в стандартной космологической модели) без введения понятия «инфляция», но и проблему начальной космологической сингулярности, делая ее скрытой.

Озвученная идея на первый взгляд звучит нереалистично. Однако, возможно, найдутся способы проверить ее методами наблюдательной космологии. Один

из способов — изучение микроволнового реликтового излучения. Вне нашей трибраны мы можем ожидать существования материи, лежащей в объемлющем четырехмерном балке. Эта материя гравитационно связана с черной дырой. Флуктуации температуры в такой материи могли бы создавать флуктуации уже в обычной, трехмерной материи, которые, в свою очередь, могли бы создать неоднородности в реликтовом излучении. Последнее же — непосредственный объект наблюдений астрономическими приборами, и подобную рябь хоть и очень трудно, но в принципе можно обнаружить.

Еще один способ проверить существование многомерности — следующий. Четырехмерная черная дыра может вращаться (довольно обычное утверждение для трехмерных черных дыр). В этом случае наш трехмерный мир на бране должен обладать слегка нарушенной симметрией, т.е. крупномасштабная структура нашей Вселенной должна различаться в разных направлениях. Такое различие тоже можно попытаться найти в данных по микроволновому реликтовому излучению.

Несмотря на то что модель голографического Большого взрыва решает ряд фундаментальных космологических проблем, в частности проблему происхождения нашей Вселенной, она порождает ряд своих собственных загадок. Например, откуда взялась прародительница нашей Вселенной?

Для ответа на этот вопрос мы можем снова обратиться к притче Платона. Когда узники вышли из пещеры, то солнечный свет выжег им глаза. Чтобы привыкнуть к яркому свету, нужно время. В начале пути познания мира узники пещеры могли изучать тени на ее стенах. Потом они смогут увидеть звезды и Луну. Позже они познают солнечный свет и сделают правильный вывод о том, что Солнце не только порождает все тени, что они видят на стенах пещеры, но дает и день, и ночь, а также смену времен года. Люди из притчи Платона никогда не постигнут того, что находится за пределами возможностей Солнца, точно так же как мы не понимаем устройства многомерного мира. Но, по крайней мере, мы с ними знаем, где можно искать ответы на вопросы о строении мироздания. ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Двали Г. Кто нарушил закон тяготения? // ВМН, № 5, 2004.
- Малдасена Х. Иллюзия гравитации // ВМН, № 2, 2006.
- Тернер М. Происхождение Вселенной // ВМН, № 11, 2009.
- Out of the White Hole: A Holographic Origin for the Big Bang. Raziq Pourhasan, Niayesh Afshordi and Robert B. Mann in Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Vol. 2014, Article No. JCAP04(2014)005; April 2014.