

Вселенная

Майкл С. Тернер

Рождение

Космологи приближаются к пониманию тех важнейших процессов, благодаря которым и была создана и сформирована современная Вселенная.

Ключевые моменты

- Наша Вселенная зародилась благодаря Большому Взрыву 13,7 миллиарда лет назад, и с тех пор постепенно расширялась и охлаждалась. Таким образом она преобразовалась из безформенной «гущи» элементарных частиц в богато структурированную космическую систему сегодняшнего дня.
- В первую микросекунду произошел период, когда материя стала доминировать над антиматерией; тогда же были созданы зачатки галактик и других структур, а также темная материя (неопределенный материал, который поддерживает целостность этих структур).
- Будущее Вселенной лежит в руках темной энергии, неизвестной формы энергии, которая и вызвала космическое расширение несколько миллиардов лет назад.

- *Примечание редактора*

Вселенная бесконечна в пространстве и времени, и за всю историю человечества была вне доступа наших инструментов и умов. Но положение дел резко изменилось в двадцатом столетии. Изменения происходили в целом благодаря гениальным идеям, начиная с общей теории относительности Эйнштейна и заканчивая современными теориями элементарных частиц. Нельзя также не упомянуть и мощнейшие инструменты - от 100- и 200-дюймовых отражателей, построенных Джорджем Эллери Хейлом и позволивших нам заглянуть за пределы Млечного Пути, до космического телескопа Хаббла, который доставил нас назад ко времени зарождения галактик. За последние 20 лет движение прогресса ускорило благодаря открытию темной материи, темной энергии и рождению смелых идей о расширении космоса и Мультивселенной.

Наше понимание Вселенной еще столетие назад было очень примитивным: недвижимая, неизменная, состоящая из одной галактики и включающая в себя несколько миллионов видимых звезд. Сегодняшняя картина - более совершенная и красочная. Космос зародился 13,7 миллиарда лет назад вместе с Большим Взрывом. Через долю секунды после взрыва, Вселенная приобрела форму горячего, бесформенного скопления самых элементарных частиц, кварков и лептонов. По мере расширения и охлаждения, слой за слоем, ее структура развивалась: нейтроны, протоны, атомные ядра, атомы, звезды, галактики, скопления галактик, и наконец, сверхскопления. Ныне обозримая часть вселенной заполнена сотней миллиардов галактик, каждая из которых содержит сто

[Автор статьи]



Майкл С. Тернер основал научное сообщество космологии, астрофизики и физики частиц. Он также ввел в Национальной Академии США учебный курс на базе нового видения теории поля. Сейчас преподает физику и космологию в институте Кавли при университете Чикаго. С 2003 по 2006 год Тернер возглавлял математическую и физическую дирекцию фонда Национальной Науки. Его наибольшие достижения – приз Уорнера в обществе американской астрономии, приз Лиленфильда в Американском физическом сообществе и награда Клопстеда в американской ассоциации преподавателей физики.

миллиардов звезд и, возможно, такое же количество планет. Сами по себе, галактики удерживаются благодаря гравитации таинственной темной материи. Вселенная продолжает расширяться и делает это все с большей скоростью, управляемой темной энергией – еще более таинственной формой энергии, чья гравитационная сила имеет более отталкивающее, нежели притягивающее свойство.

Наибольший раздел в истории нашей Вселенной — о ее эволюции из скопления простейших кварков в комплексную систему, которую мы можем наблюдать в галактиках, звездах, планетах и самой жизни. Эти объекты развивались один за другим на протяжении миллиардов лет и сопровождалась простейшими законами физики. В нашем путешествии назад в начало этого созидания, космологи прежде перемещаются через уже утвержденную историю назад в первую микросекунду; затем в момент 10^{-34} секунды после начала, для которого некоторые идеи уже сформированы, но еще не подтверждены доказательствами; и наконец, к наиболее ранним моментам творения, о которых все еще ведутся оживленные споры. Тем не менее, однозначное понимание о происхождении вселенной до сих пор лежит за пределами нашего разума, и нам остаются лишь противоречивые догадки подобно идее о Мультивселенной, согласно которой вселенная представляет из себя бесконечное число не связанных между собой субвселенных.

Расширяя Вселенную

Пользуясь 10дюймовым телескопом Хукера на горе Уилсон в 1924 году, Эдвин Хаббл показал, что неясные туманности, о которых велись споры не-

сколько сотен лет, оказались галактиками подобной нашей. Таким образом, он увеличил их приблизительное видимое количество на сотню миллиардов. Через несколько лет Хаббл показал, что галактики движутся независимо друг от друга, согласно определенной модели, описанной математической зависимостью. Сейчас она носит название закона Хаббла, следуя которому, чем дальше движутся галактики, тем большую скорость они развивают. Именно закон Хаббла привел к выводу о теории большого взрыва 13,7 миллиарда лет назад.

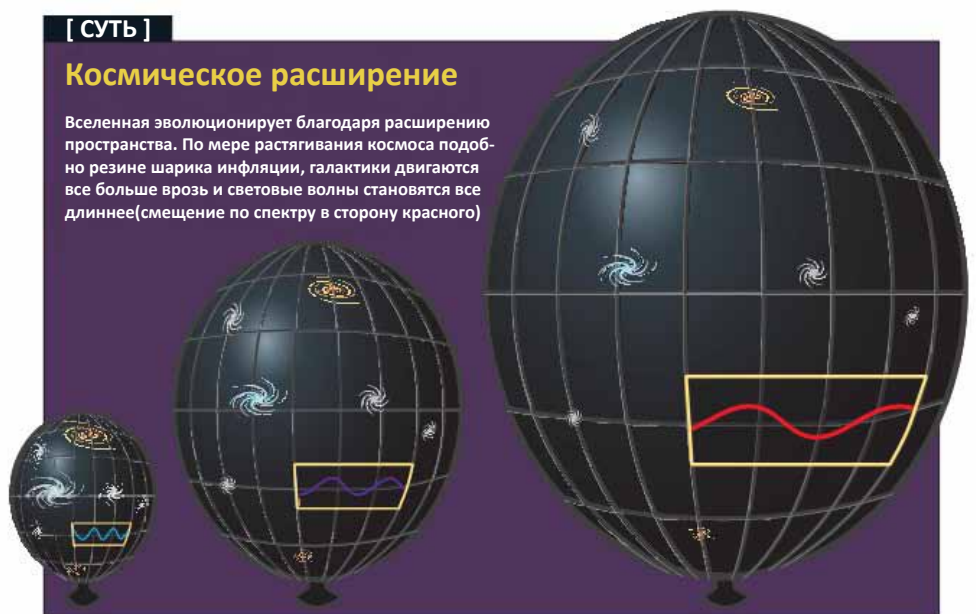
Закон Хаббла, без обращений к теории относительности, также говорит о следующем: пространство расширяется само по себе, а вместе с ним движутся и галактики (см. схему ниже). Свет также подвергается изменению или, если быть точнее, смещается по спектру в сторону красного — отчего его энергия слабеет, таким образом охлаждая вселенную по мере ее расширения. Космическое расширение объясняет, как вселенная пришла к тому состоянию, которое мы можем наблюдать сегодня. Подобно тому, как космологи словно бы перематывают время, мы сможем представить вселенную, которая становится все более разреженной, горячей и предельно простой. В данном исследовании зарождения мы также изучим внутреннее строение природы, используя достоинства ускорителя, более мощного, чем что-либо построенное на Земле — сам Большой Взрыв.

Всматриваясь в космос с помощью телескопов, астрономы заглядывают в прошлое — и чем больше телескоп, тем оно глубже. Свет от удаленных галактик показывает нам ранние эпохи, и количе-

[СУТЬ]

Космическое расширение

Вселенная эволюционирует благодаря расширению пространства. По мере растягивания космоса подобно резине шарика инфляции, галактики движутся все больше врозь и световые волны становятся все длиннее (смещение по спектру в сторону красного)



ство этого света в приближении к красному свидетельствует о том, насколько «вырос» удаленный объект. Самый большой рекорд по смещению в сторону красного, равный восьми, обозначает время, когда вселенная была в девять раз меньше нынешних ее размеров и возрастом всего в один миллион лет. Телескоп Хаббла и 10-метровые телескопы Кека позволяют наблюдать период через несколько миллиардов лет после Большого Взрыва, когда зародились галактики, подобные нашей. Свет из более ранних времен настолько смещен в спектре, что астрономы ищут его в инфракрасных и радиочастотах. Новые телескопы, такие как Космический Телескоп Джеймса Уэбба (6,5-метровый инфракрасный телескоп) и Массив Большого Миллиметра из Атакаммы (ALMA – Atacama Large Millimeter Array, сеть, состоящая из 64 радиотарелок в северной части Чили) позволяют нам посмотреть на рождение самых первых звезд и галактик.

Компьютерные симуляторы говорят о том, что такие звезды и галактики могли зародиться, когда возраст вселенной составлял около 100 миллионов лет. До этого был период, называемый «темной эпохой», когда космос был абсолютно черным. Заполненный бессмысленной кашей, он на 83% состоял из темной материи, и на 17% - из водорода и гелия, который уменьшался по мере роста галактик. Материя была крайне непостоянной в плотности, и гравитация работала на ее выравнивание: более плотные области расширялись медленнее, чем менее плотные. За 100 миллионов лет самые плотные области перестали расширяться, и начали разрушаться. Подобные участки состояли из 100 миллионов солнечных масс каждая. Они были первыми гравитационно-связанными объектами во вселенной.

Темная материя была открыта благодаря ее массе, но она была не способна поглощать или сеять свет, о чем говорит ее название. Поэтому она оставалась в расширяющемся облаке. Газ из водорода и гелия, с другой стороны, производил свет, терял энергию и концентрировался в своих облаках. В конечном итоге он взрывался, образуя первые звезды. Такие звезды были намного более массивными, нежели сегодняшние — в сотни раз

[Временная шкала]

Перед Большим Взрывом

Космологи до сих пор не знают, с чего же именно началась наша Вселенная, но современная наука уже имеет некоторые утверждения на сей счет

А Без предыдущей эры
Материя, энергия, космос и время появились вместе с большим взрывом

Б Возникновение квантов
Обычное пространство и время развились из первобытного состояния, описанного квантовой теорией гравитации

В Мультивселенная
Наша вселенная и другие отделились от бесконечного пространства

Г Циклическая вселенная
Большой Взрыв - последняя стадия в постоянном цикле расширения, взрыва и нового расширения.

10^{-43} секунды
Эра Планка; самое раннее, не имеющее смысла время; пространство и время обретают форму

(с предыдущего цикла)

больше массы Солнца. Они прожили короткую жизнь, прежде чем взорваться и превратиться в первые тяжелые элементы. В течение последующего миллиарда лет сила гравитации скапливала эти облака массой в миллион Солнц в первые галактики.

Излучение от первых водородных облаков, очень смещенное в сторону красного от постоянного расширения, должно быть замечено рядами радиотенн с общей площадью расположения в один квадратный километр. Когда строительство такого сооружения будет завершено, подобные радиосети будут наблюдать за тем, как первое поколение звезд и галактик ионизирует водород, тем самым подводя к концу эру темных времен [см. статью «Темная Эпоха Вселенной» А. Лойба, журнал Scientific American, ноябрь 2006].

Смутное свечение горячего начала
Перед темной эпохой было



СВЕРХДАЛЕКОЕ НЕБО ХАББЛА, наиболее светочувствительное изображение космоса, сделанное когда-либо, открывает нам более тысячи галактик в их ранних стадиях формирования.

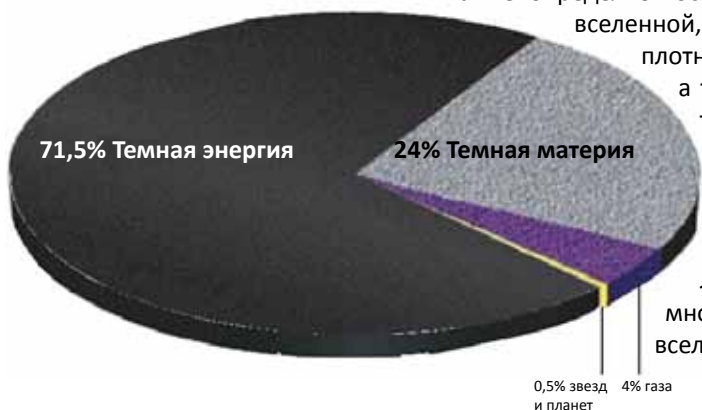
Космическая временная шкала продолжается четко определенными событиями, которые привели к современному виду Вселенной.

Ранние моменты Большого Взрыва

Формирование атомов



МАССА ВСЕЛЕННОЙ состоит из темной энергии и темной материи, ни одна из которых пока не была обнаружена. Обычная материя, из которой созданы звезды, планеты и межзвездный газ, составляет лишь малую часть от всей массы.



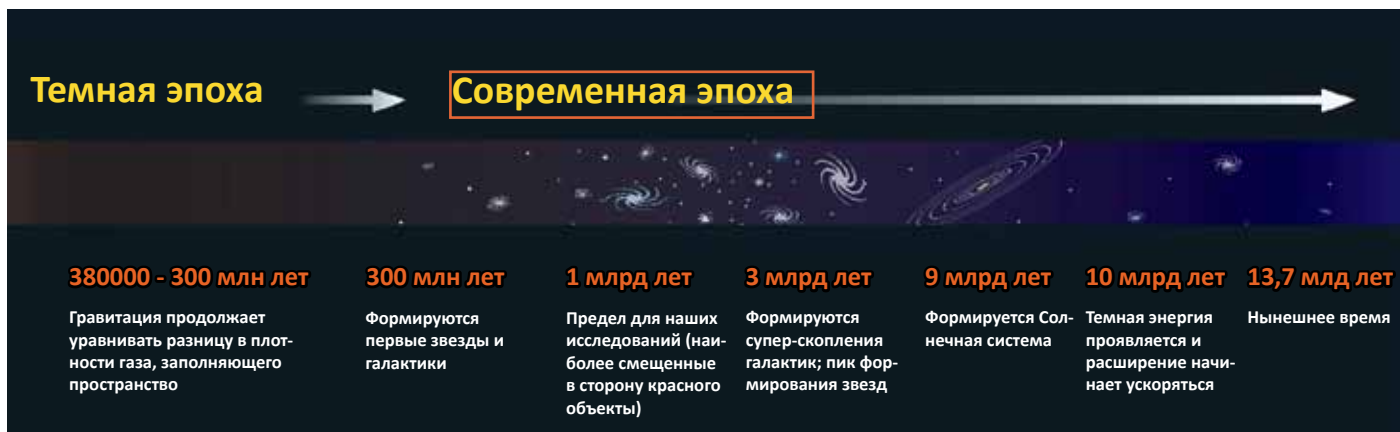
лишь свечение от горячего Большого Взрыва со значением смещения в спектре, равным 1100. Это излучение постепенно сменялось от видимого света (красно-оранжевое свечение) до микроволн инфракрасного. Заглянув в то время, мы лишь увидим стену микроволнового излучения, полностью заполонившего небо - космическое микроволновое фоновое излучение (КМФ), открытое в 1964 г. Арно Пензаесом и Робертом Уилсоном. Оно позволяет взглянуть на вселенную в ее нежном возрасте 380 000 лет, периоде формирования атомов. Перед этим, вселенная представляла собой практически бесформенное скопление атомных ядер, электронов и фотонов. По мере охлаждения до температуры в 3000 кельвинов ядра и электроны сталкивались, образуя атомы. Фотоны прекращали сталкиваться с электронами и двигались через пространство без препятствий, освобождая вселенную для возникновения звезд и галактик.

В 1992 году космический спутник-исследователь дальнего космоса, наблюдая некоторую «комковатость» в материи, обнаружил, что КМФ-излучение имеет слабые колебания - порядка 0,001 процента. Скорее всего, эти «комки» и сыграли роль источников для галактик и больших звезд, что возникли позже благодаря работе гравитации. Структура подобных колебаний КМФ-излучения также определяет основные свойства вселенной, такие как общая плотность и структура, а также дает некоторые наводки о ее прошлых моментах. Внимательное изучение этих колебаний открыло много нового о вселенной [см. иллю-

страцию].

По мере просмотра нашего фильма об эволюции Вселенной с начала времен, мы также можем наблюдать первую плазму, стающую все горячее и плотнее. Ближе к 100 000 лет плотность энергии излучения начинает превышать энергию материи, которая удерживает последнюю от скапливания. Таким образом, этот момент обозначает начало гравитационного собрания всех тех структур, которые наблюдаются во вселенной сегодня. Но вернувшись назад, когда вселенная была не старше одной секунды, атомным ядрам еще предстояло сформироваться; существовали лишь их составные части - протоны и нейтроны. Ядра появились, когда вселенная была в возрасте нескольких секунд, а значения температуры и плотности были подходящими для ядерных реакций. Этот процесс формирования ядер (нуклеосинтез) в большом взрыве произвел лишь самые простые элементы периодической таблицы: большие количества гелия (порядка 25% всех атомов по массе) и меньшие количества лития и изотопов дейтерия и гелия-3. Остальная часть плазмы (порядка 75%) оставалась в форме протонов, которые бы со временем стали атомами водорода. Все остальные элементы в периодической таблице были сформированы в течение миллионов лет в звездах и звездных взрывах.

Теория нуклеосинтеза отлично объясняет множества элементов и изотопов, обнаруженных в наиболее первобытных образцах вселенной - а именно в самых древних звездах и в газовых облаках с наибольшим значением смещения по спектру. Дейтерий, чувствительный к плотности атомов во вселенной, играет особую роль: его количество говорит о том, что обычная материя составляла 4,5%±0,1% от общей энергетической плотности. (Оставшуюся часть составляла темная



материя и темная энергия). Это расценивается как точное совпадение с моделью, что была тщательно выведена из анализов КМФ-излучения. Такое заявление стало большим триумфом. Оба этих исследования, первое из которых основано на ядерной физике, когда вселенная была не старше одной секунды, и второе, выходящее из атомной физики и свидетельствующее о вселенной в ее возрасте в 380 000 лет, определяют строгое соответствие не только с нашей моделью эволюции космоса, но и со всей современной физикой.

Ответы в скоплениях кварков

Менее чем через микросекунду после взрыва, протоны и нейтроны еще не существовали и вселенная являла собою скопление естественных базовых строительных блоков: кварки, лептоны, и переносчики слабого взаимодействия (фотоны, W- и Z-бозоны и глюоны). Мы можем быть уверены, что кварковое скопление существовало, потому что эксперименты на ускорителях частиц позволили восстановить подобные условия на Земле [см. «Первые несколько микросекунд», авт. М. Раерден и У. А. Зейс, журнал "Scientific American", май 2006].

Чтобы исследовать эту эпоху, космологи полагаются не на большие и мощные телескопы, а на сильные идеи из физики частиц. Развитие стандартной модели физики частиц 30 лет назад привело к смелым предположениям, включая теорию струн, в которой речь идет о том, как кажущиеся разрозненными фундаментальные частицы и силы могут иметь между собой связи. Как оказывается, эти новые идеи имеют последствия для космологии, которые важны для понимания Большого Взрыва. Они дают подсказки о глубоких и внезапных связях между миром большого и малого. Три ключевых вопроса – суть темной материи, асимметрия материи и антиматерии, и происхождение кваркового скопления – наконец начинают проясняться.

Теперь лишь обнаружено, что именно в период раннего кваркового скопления

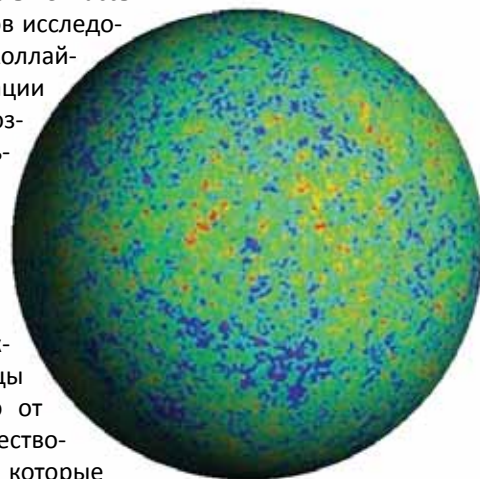
появилась темная материя. Суть темной материи остается неясной, но ее существование подтверждено. Наша галактика и любая другая, точно так же как и скопления галактик, удерживаются благодаря гравитации невидимой темной материи. Независимо от того, что представляет собой темная материя, она должна хотя бы слабо взаимодействовать с обычной материей, иначе бы она проявилась как-либо иначе. Попытки найти объединяющие основы для сил и частиц природы привели к подозрениям о стабильных или долгоживущих частицах, которые должны были бы и составлять саму темную материю. Тогда такие частицы представляли бы из себя остатки кваркового скопления и имели бы свойство слабо взаимодействовать с атомами.

Возможно, роль этих частиц играют т.н. нейтрино, чья предполагаемая их масса – от 100 до 1000 раз больше массы протона, исходя из результатов исследований Большого Андронного Коллайдера в европейской организации по ядерным исследованиям возле Женевы. Ученые специально построили сверхчувствительные детекторы и другие устройства для наблюдения за этими частицами и продуктами их взаимодействия.

Второй кандидат – аксионы, сверхлегкие частицы массой в одну триллионную от массы электрона. Их существование открыто тонкостями, которые Стандартная Модель описала в поведении кварков. Исследования показали, что в очень сильном магнитном поле аксион может трансформироваться в фотон.

И нейтрино и аксионы имеют одно важное свойство – они, в научном понимании этого слова, «холодные». Хотя и сформировались в крайне горячих условиях, они медленно двигались и поэтому легко образовывали галактики.

Фаза раннего кваркового скопления наверняка содержит ответ на вопрос,



КОСМИЧЕСКОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ ФОНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ - это снимок вселенной в возрасте 380 000 лет. Небольшие колебания интенсивности (обозначены цветом) - Розеттский камень, который дает ключ к таким параметрам вселенной, как возраст, плотность, геометрия и полная ее структура.

почему сегодняшняя Вселенная содержит преимущественно материю, а не материю вместе с антиматерией. Физики полагают, что Вселенная изначально имела одинаковое количество одного и другого, но в какой-то момент образовалось слабое преимущество материи – приблизительно один дополнительный кварк на каждый их миллиард. Этот дисбаланс привел к тому, что в противостоянии материи и антиматерии при расширении и охлаждении уцелели все же материальные кварки. Более 40 лет назад эксперименты с ускорителем показали, что законы физики больше работают на материю, и хотя этот аспект еще не до конца изучен, все указывает на то, что этот перевес и привел к созданию избыточных кварков.

Скопление кварков само по себе, как предполагается, возникло очень рано – приблизительно в момент, равный 10^{-34} секунды после Большого Взрыва, при процессе «раз-

дувания» Вселенной, известном как *инфляция*. Этот взрыв, ведомый энергией нового поля (отдаленно напоминающего электромагнитное), объяснил такие базовые свойства космоса, как его общая бесформенность и «комковатость», что породила галактики и другие структуры во вселенной. По мере распада поля инфляции, последнее выпускало остающуюся энергию в кварки и другие частицы, создавая таким образом тепло большого взрыва и само скопление кварков.

Инфляция показала глубокую связь между кварками и космосом: квантовые флуктуации в поле инфляции на субатомном уровне приобрели астрофизические размеры благодаря скорому расширению и стали источниками для всех объектов современной Вселенной. Другими словами, картинка, которую мы видим на КМФ-излучении неба, представляет собой огромное изображение субатомного мира. Значения уровня КМФ-

излучения с таким предположением представляет сильнейшее доказательство того, что инфляция или что-либо похожее на нее появилось очень рано в истории Вселенной.

Рождение Вселенной

По мере попыток космологов идти дальше в понимании зарождения Вселенной, их идеи становятся все более хрупкими. Общая теория относительности Эйнштейна обеспечила теоретический фундамент для столетия прогресса в нашем понимании эволюции вселенной. И хотя она еще не согласована с основоположными принципами современной физики и квантовой теории, такую задачу еще предстоит решить науке. Только с такой универсальной теорией мы сможем обратиться к самым ранним моментам Вселенной – т. н. эре Планка, 10^{-43} секунды, когда пространство-время только приобретало форму. Предварительные попытки создать такую теорию привели к большим дискуссиям о самом Нача-

Будущее

Такие предсказуемые события, как столкновения галактик - наше ближайшее будущее. Но дальнейшая судьба нашей вселенной зависит от того, продолжит ли темная энергия ускорять расширение пространства. На данный момент есть четыре варианта исхода.

А Ускорение прекращается и Вселенная постоянно расширяется

10 триллионов лет

Сгорают последние звезды

Б Ускорение продолжается

30 млрд лет

Космическая пелена: все объекты исчезают из нашего поля зрения

В Ускорение увеличивается

50 млрд лет

Большой разрыв: темная энергия разрушает все возможные объекты

Г Ускорение сменяется быстрым торможением и коллапсом

30 млрд лет

Критический момент, за которым следует Большой Взрыв и новый цикл

(на следующий цикл)

Во тьме

Самыми неизученными свойствами во вселенной обладает темная энергия, недавно открытая и странная форма энергии, заставляющая расширяться пространство все быстрее. Темная энергия взяла контроль над материей несколько миллиардов лет назад. Несмотря на это, экспансия замедлялась из-за гравитационного притяжения, приводимого в действие материей, и гравитация была способна создавать структуры, подобные галактикам и суперскоплениям. Теперь, из-за влияния темной энергии, структуры большие чем суперскопления образоваться не могут. На самом деле, проявилась темная энергия раньше чем она проявилась - скажем, в возрасте вселенной в 100 миллионов лет - формирование структур прекратилось раньше чем могли бы зародиться даже галактики, и нас бы здесь не было.

У космологов есть только элементарные подсказки к вопросу о том, чем может быть темная энергия. Ускорение расширения требует наличия некой отталкивающей силы, а общая теория относительности Эйнштейна говорит, что отталкивающей может быть толь-

ко гравитация экстремально эластичной формы энергии.

Квантовая энергия, заполняющая пустое пространство, может работать подобным образом. Проблема в том, что теоретические расчеты количества квантовой вакуумной энергии не соответствуют нашим наблюдениям (причем значения разнятся в несколько раз!). Как альтернатива, космическое ускорение может быть вызвано не новым типом энергии, но процессом, который высвобождает такую энергию, например отсутствия проявления общей относительности или влияние невидимых пространственных измерений.

Если вселенная на данный момент продолжает ускоряться, тогда через тридцать миллиардов лет все следы большого взрыва исчезнут. Свет от всех ближайших галактик будет слишком смещен по спектру, чтобы его обнаружить; температура КМФ-излучения будет слишком малой для измерения; и вселенная будет очень напоминать ту, что мы знали 100 лет назад, прежде чем наши инструменты стали достаточно мощными, чтобы познать ее настоящую сущность. - М.С.Т.

ле. Теория струн, к примеру, предсказывает существование дополнительных измерений космоса и возможно других вселенных, существующих в еще большем пространстве. То, что мы называем Большим Взрывом, могло быть на самом деле столкновением нашей Вселенной с другой [см. «Миф Начала Времени», авт. Г. Венециано, журнал *Scientific American*, май 2004]. Сочетание теории струн с концепцией инфляции привело пожалуй к самой смелой идее – идее о мультивселенной, согласно которой Вселенная представляет из себя бесконечное число рассоединенных частей, каждая из которых обладает своими законами физики.

Концепция Мультивселенной находится еще в зародыше, но уже выявляет два ключевых теоретических принципа. Первое – уравнения описывающие инфляцию четко определяют, что если инфляция случилась однажды, она должна происходить снова и снова, с бесконечным числом областей, в которых она проявляется. Ничто не может перемещаться между этими областями, поэтому они не воздействуют друг на друга. Второе – теория струн предполагает, что эти области имеют различные физические параметры, такие как число пространственных измерений и виды стабильных частиц.

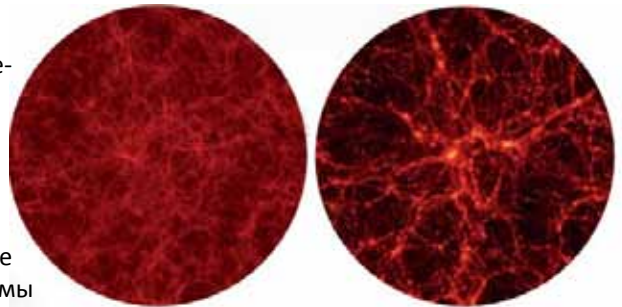
Идея Мультивселенной отвечает на два самых важных вопроса в науке: что случилось перед Большим Взрывом и почему законы физики выглядят именно так (известные размышления Эйнштейна о том, «был ли у Бога выбор» в отношении законов физики). Мультивселенная поднимает вопрос о периоде до Большого Взрыва, так как это предполагает наличие других больших взрывов, вызванных каждый своим всплеском инфляции. Таким образом, вопрос Эйнштейна стает неактуальным: с бесконечностью числа законы физики могут варьироваться от Вселенной ко

Вселенной.

Космологи имеют смешанные чувства об идее Мультивселенной. Если рассоединенные субвселенные существуют, то мы не сможем убедиться

в этом; они словно лежат вне границ науки. Часть меня хочет кричать: «Одна Вселенная за раз, пожалуйста!» С другой стороны, Мультивселенная разрешает различные концептуальные проблемы. Если быть точнее, Хаббл просто приблизит для нас нашу вселенную где-то в 100 млрд раз, а утверждение Коперника о том, что Земля не центр Вселенной в 16м столетии, покажется лишь мизерным шагом в понимании нашего места в космосе.

Современная космология унизила нас. Мы сделаны из протонов, нейтронов и электронов, которые в сумме составляют лишь 4,5% вселенной, и существуем мы лишь благодаря слабым взаимодействиям между большим и малым. Благодаря законам микрофизики, материя стала доминировать над антиматерией и сделала вселенную «комковатой», что в свою очередь позволило дать жизнь галактикам и существовать с помощью гравитации темной материи [см изображение выше]. В то же время, космология по своей натуре самонадеянна. Идея, что мы можем понять нечто настолько огромное в пространстве и времени, как Вселенная, звучит нелепо. Это странное сочетание скромности и надменности в прошлом столетии занесло нас далеко в понимании сущности нашей Вселенной и ее рождения. Я жду дальнейшего прогресса в ближайшее время, и честно верую в то, что мы живем в золотой век космологии.



Если бы Вселенная имела еще больше темной энергии чем сейчас, она оставалась бы почти бесформенной (рис. слева), без больших структур, которые мы видим (рис. справа)

УЗНАТЬ БОЛЬШЕ

Ранняя Вселенная. Эдвард В. Колб и Майкл С. Тернер. Westview Press, 1994.

Инфляционная Вселенная. Алан Гут. Basic. 1998.

Кварки и Космос. Майкл С. Тернер в журнале *Science*, том 315, стр. 59-61, от 5 января 2007 года.

Темная Энергия и Ускоряющаяся Вселенная. Дж. Фриман, М. Тернер и В. Хантерер в «*Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*», том 46, стр. 385-432, 2008.