

Уэйн Ху, Мартин Уайт

РЕЛИКТОВАЯ МУЗЫКА ВСЕЛЕННОЙ

Последние наблюдения реликтового излучения показали, что молодая Вселенная была заполнена гармоническими колебаниями. Вначале был свет. На заре истории мироздания ионизованное вещество испускало излучение, а затем снова захватывало его. Позднее, когда Вселенная расширилась и остыла, электроны и протоны соединились, образовав нейтральные атомы, и вещество утратило способность захватывать свет. Спустя 14 млрд. лет испущенные во время великого освобождения света фотоны образуют космический микроволновый фон (КМФ), или реликтовое излучение. Настройте телевизор на любую свободную от телевизионных каналов частоту, и около 1% помех, которые вы увидите на экране, будет обусловлено космическим микроволновым фоном. Астрономы установили, что реликтовое излучение принимается практически одинаково со всех направлений. Его всездесущность и постоянство свидетельствуют о том, что оно возникло задолго до того, как сформировались звезды, планеты и галактики. Простота Вселенной тех времен позволяет с высокой точностью предсказать свойства КМФ и сравнить их с результатами точнейших наблюдений, которые проводятся с помощью радиотелескопов, установленных на аэростатах и космических аппаратах. Изучение реликтового излучения помогает ученым найти ответы на некоторые вечные вопросы: из чего состоит Вселенная, каков ее возраст, откуда взялись все существующие в ней объекты? Впервые КМФ был обнаружен в 1965 г. Арно Пензиасом (Arno Penzias) и Робертом Уилсоном (Robert Wilson), которые искали источник таинственного фонового шума, принимаемого радиолокационными антеннами. Их открытие окончательно подтвердило теорию Большого взрыва, согласно которой Вселенная на ранних этапах существования представляла собой плотную горячую плазму, состоящую из заряженных частиц и фотонов. С тех пор в результате расширения Вселенной реликтовое излучение остыло до 2,7К. Однако в момент, когда оно было испущено, его температура составляла около 3000К. Спектр КМФ, измеренный в 1990 г. искусственным спутником Земли COBE (Cosmic Background Explorer), в точности совпал с расчетным. Однако это впечатляющее достижение затмила настоящая сенсация: COBE обнаружил небольшие, порядка 0,001%, различия температуры реликтового излучения, приходящего с разных направлений. Более 20 лет ученые пытались выявить анизотропность КМФ, которая помогла бы понять, как в ходе эволюции

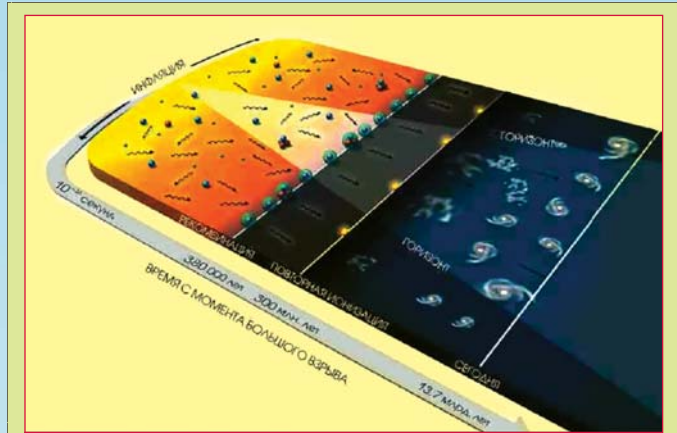
первичной плазмы образовались галактики, звезды и планеты. В 2001 г. для составления карты КМФ был запущен космический аппарат WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), который отошел от Солнца на 1,5 млн. км дальше Земли и остался на околосолнечной орбите. На основании полученных с его помощью данных был сделан вывод, что пространственное распределение температуры реликтового излучения подчиняется определенной закономерности. Более того, результаты наблюдений позволили точнее оценить возраст, состав и геометрию Вселенной. Ученые словно пытались определить конструкцию музыкального инструмента по характеру его звучания. Однако космическую симфонию исполняют очень странные музыканты под аккомпанемент удивительных совпадений, в которых нам предстоит разобраться. Еще в конце 1960-х гг. Джеймс Пиблз (P. James E. Peebles) и Джер Ю (Jer Yu) из Принстонского университета пришли к выводу, что в молодой Вселенной должны были распространяться звуковые волны. (Почти в то же время к очень похожим заключениям пришли Яков Зельдович и Рашид Сюняев из Московского института прикладной математики.) Когда излучение еще томилось в веществе, тесно связанные системы фотонов, электронов и протонов вели себя как газ, в котором любое возмущение плотности порождало продольную звуковую волну, представляющую собой распространяющуюся последовательность сжатий, нагревающих газ, и разрежений, охлаждающих его. Так возникла изменяющаяся картина вселенских температурных флуктуаций.

ПОИСК НАЧАЛ

Спустя 380 тыс. лет после Большого взрыва Вселенная выросла примерно до одной тысячной сегодняшних размеров. Температура газа понизилась, и протоны начали захватывать электроны, образуя атомы. Этот процесс, называемый рекомбинацией, коренным образом изменил обстановку. Фотоны практически перестали сталкиваться с заряженными частицами и впервые получили возможность свободно распространяться в пространстве. Так картина горячих и холодных областей, созданная звуковыми волнами, навеки застыла в структуре КМФ. Тогда же вещество освободилось от давления излучения, препятствовавшего образованию сгустков материи, которые под действием сил тяготения уплотнились и со временем стали звездами и га-

- Инфляция (быстрое расширение Вселенной в первые мгновения после Большого взрыва) возбудила звуковые волны, которые вызывали поочередные сжатия и расширения областей первичной плазмы.
- Когда Вселенная достаточно охладилась и образовались нейтральные атомы, картина распределения плотности, созданная акустическими волнами, запечатлелась в реликтовом излучении.
- Изучив акустическую модуляцию реликтового излучения, космологи смогли оценить возраст, состав и геометрию Вселенной. Выяснилось, что основным компонентом современной Вселенной является таинственная темная энергия.

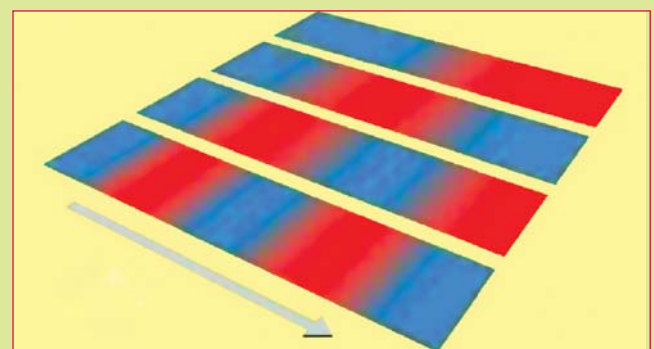
лактиками. Современный уровень вариаций температуры КМФ, составляющий 0,001%, в точности соответствует амплитуде, необходимой для образования крупномасштабных структур, которые мы видим сегодня. Что же послужило источником первичного возмущения, породившего звуковые волны? Вопрос непростой. Наблюдая за развитием Вселенной с самого начала, мы могли бы видеть лишь пространство, ограниченное так называемым горизонтом, радиус которого равен расстоянию, которое успел пройти свет с момента Большого взрыва. Поскольку информация не может передаваться быстрее света, горизонт определяет сферу влияния любого физического механизма. Если, пытаясь выяснить происхождение структур определенного размера, мы станем двигаться в прошлое, горизонт будет сужаться и в конце концов станет меньше, чем интересующие нас образования. Следовательно, ни один физический процесс, подчиняющийся закону причинности, не поможет нам разобраться в их генозисе (так называемая проблема горизонта). Согласно теории инфляции, ускоренное расширение Вселенной сразу после Большого взрыва происходило под влиянием особого поля — инфлатона. Таким образом, сегодня мы видим лишь малую часть того, что наблюдалось до инфляции. Квантовые флуктуации инфлатона, усиленные быстрым расширением, привели к появлению начальных возмущений, приблизительно одинаковых по амплитуде как в малых, так и в больших областях пространства. Так в первичной плазме возникли пространственные колебания плотности энергии. Картина звуковых волн, застывшая в КМФ, подтверждает теорию инфляции. Поскольку все возмущения плотности появились одновременно в первый же момент творения, звуковые волны оказались синхронизированными по фазе. В результате сформировался спектр с обертонами, как у музыкального инструмента. Если дуть в трубу с открытыми концами, то основная частота звука будет соответствовать волне (моду колебаний) с максимальным смещением воздуха на концах трубы и минимальным в ее середине. Длина волны основной моды равна удвоенной длине трубы. Но в звуке будут присутствовать обертоны, соответствующие волнам, которые вдвое, втрое, вчетверо и т.д. короче основной волны. Иными словами, частоты обертонов (высшие гармоники) равны основной частоте (первой гармонике), умноженной на 2, 3, 4 и т.д. Именно обертоны обогащают звук и позволяют отличить скрипку Страдивари от рядового инструмента. Анализируя звук в ранней Вселенной, мы должны рассматривать волны, колеблющиеся во времени, а не в пространстве. Длине трубы будет соответствовать промежуток времени, в течение которого первичная плазма была заполнена звуковыми волнами, исчезнувшими во время рекомбинации. Предположим, что в начале инфляции в некоторой области пространства температура плазмы была максимальной (наибольшее положительное смещение). В процессе распространения звуковых волн ее плотность стала колебаться, и температура устремилась сначала к среднему (нулевое смещение), а затем к минимальному значению (наибольшее отрицательное смещение). Волна, благодаря которой температура в данной



В период инфляции Вселенная быстро расширялась, и плазма, состоящая из фотонов и заряженных частиц, распространилась далеко за пределы горизонта, ограничивающего область, доступную взгляду гипотетического наблюдателя. Через 380 тыс. лет началась рекомбинация: возникли первые атомы и реликтовое излучение. Спустя еще 300 млн. лет свет первых звезд снова ионизировал большую часть водорода и гелия



Акустический спектр ранней Вселенной содержал обертоны, свойственные музыкальным инструментам. Если вы дуете в трубу, основной тон соответствует волне с наибольшим сжатием воздуха (синий цвет) у мундштука и наибольшим разрежением (красный цвет) у открытого конца. Но в звуке также присутствуют обертоны, длины волн которых в 2 (первый обертоны), 3 (второй обертоны), 4 (третий обертоны) и т. д. раза меньше длины основной волны.



В молодой Вселенной звуковые волны колебались во времени, а не в пространстве. После инфляции основная волна вызвала сжатие плазмы в одних областях и расширение в других, в результате чего ко времени рекомбинации температура реликтового излучения в первых достигла максимума (синий цвет), а во вторых — минимума (красный цвет). Из-за наличия обертонов температура достигла максимальной и минимальной величины и в меньших областях



Фотоны реликтового излучения, испущенные через 380 тыс. лет после Большого взрыва, в большинстве своем распространялись по наблюдаемой Вселенной беспрепятственно. Однако некоторые из них все же испытали рассеяние на заряженных частицах, что вызвало поляризацию излучения в обширных областях небесной сферы. Результаты поляризационных наблюдений, выполненных космическим аппаратом WMAP, свидетельствуют о том, что около 17% фотонов рассеялись разреженным ионизованным газом через несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва.

Столь значительная доля рассеянных фотонов оказалась полной неожиданностью. Прежде космологи предполагали, что большая часть водорода и гелия была ионизована излучением первых звезд, очень массивных и ярких. Но по оценкам теоретиков, повторная ионизация произошла примерно через миллиард лет после Большого взрыва, и поэтому рассеяние должны были претерпеть лишь около 5% фотонов реликтового излучения. Данные, полученные от WMAP, говорят о том, что повторная ионизация произошла гораздо раньше. Так модель первого этапа формирования звезд была поставлена под сомнение. Не столь очевидным теперь кажется и то, что первоначальные флуктуации плотности в первичной плазме были примерно одинаковыми во всех масштабах. Если амплитуды мелких флуктуаций были больше амплитуд крупных, первые звезды могли сформироваться раньше. Первые звезды повторно ионизовали окружающий газ.

Сведения, добытые WMAP, содержат и другой намек на отклонение от масштабной инвариантности флуктуаций, установленной спутником COBE. В крупных масштабах, соответствующих областям неба с угловыми размерами порядка 60° , WMAP и COBE обнаружили странный дефицит отклонений температуры реликтового излучения, который, впрочем, может оказаться просто результатом недостаточной статистики: поскольку угловой размер всего неба составляет 360° , столь крупных областей недостаточно, чтобы составить статистически достоверную выборку. Тем не менее некоторые теоретики считают, что этот дефицит свидетельствует об ошибочности моделей инфляции, темной энергии или топологии Вселенной

области упала до минимума точно ко времени рекомбинации, является основной модой ранней Вселенной. Обертоны с вдвое, втрое и т.д. большими частотами в этот момент обеспечивают максимальные смещения, положительные или отрицательные, в меньших областях пространства.

Анализируя результаты наблюдений реликтового излучения, космологи построили график зависимости величины температурных отклонений от размера горячих и холодных областей, т.е. энергетический спектр. Оказалось, что угловой размер зон с наибольшими вариациями температуры составляет около одного градуса. Во время рекомбинации их средний диаметр не превышал 1 млн. световых лет, но в ходе тысячекратного расширения Вселенной увеличился примерно до 1 млрд. световых лет. Наличие в энергетическом спектре нескольких ярко выраженных пиков, из которых первый и самый высокий соответствует основной моде, а все последующие — обертонам, подтверждает гипотезу об одновременности возникновения звуковых волн. Если бы возмущения создавались непрерывно во времени, то спектр не был бы столь гармоничен.

Согласно теории инфляции амплитуды звуковых волн были примерно одинаковыми при любых пространственных масштабах. Однако после третьего пика наблюдается резкий спад спектра. Дело в том, что произошло затухание коротких звуковых волн. Акустическая волна не может распространяться, если ее длина меньше средней длины свободного пробега частиц, из которых состоит газ или плазма. При нормальном атмосферном давлении молекулы, из которых состоит воздух, между двумя соударениями успевают пролететь примерно 10^{-5} см. В первичной плазме накануне рекомбинации это расстояние составляло примерно 10 тыс. световых лет. (Плотность Вселенной в те времена была большой только по сравнению с современным значением, которое с тех пор уменьшилось в миллион раз.) После того, как Вселенная расширилась в 1000 раз, оно увеличилось до 10 млн. световых лет. Поэтому амплитуды пиков энергетического спектра, которые соответствуют размерам, не превышающим 10 таких расстояний, быстро убывают.

Как музыканты отличают скрипку мирового класса от обычной по богатству обертонов, так и космологи определяют форму и состав Вселенной, анализируя спектр первичных звуковых волн. Карта КМФ помогает оценить угловые размеры холодных и горячих областей небесной сферы. А поскольку скорость, с которой распространялся звук в первичной плазме, известна, ученые смогли вычислить длину основной моды акустических колебаний на момент начала рекомбинации. Также стало известно, что фотоны реликтового излучения, достигшие Земли, прошли около 45 млрд. световых лет. (Хотя они двигались в течение 14 млрд. лет, расширение Вселенной удлинит их путь.) Таким образом, космологи получили полную информацию о треугольнике, образованном волной, и убедились, что сумма его углов равна 180° . Значит, пространство нашей Вселенной практически плоское и подчиняется законам Евклидовой геометрии. Отсюда следует, что средняя плотность энергии в нем близка к так называемому критическому значению и составляет около 10^{-29} г/см³. Интересные сведения о разделении вещества и энергии несут в себе амплитуды обертонов. Если поведение обычных звуковых волн определяется исключительно давлением в газе, то в молодой Вселенной заметное влияние на них оказывала гравитация. Сила тяготения сжимала вещество в более плотных областях и в зависимости от фазы колебаний усиливала или ослабляла сжатия и разрежения. Анализируя модуляцию волн, можно определить мощность гравитации, которая, в свою очередь, позволяет судить о материально-энергетическом составе среды. На заре мироздания, как и ныне, существовало обычное вещество, состоящее в основном из барионов — протонов и нейтронов, и холодная темная материя, которая создает собственное гравитационное поле, но практически не взаимодействует с обычным веществом. Вклад в массу первичного газа и, следовательно, в тяготение вносило как обычное, так и темное вещество, но сжатую и разреженную в звуковых волнах подвергалось только первое. При рекомбинации основная волна «застыла» в положении, когда в областях более высокой плотности газа гравитация усиливала сжатие обычного

вещества. Однако первый обертон с вдвое меньшей длиной волны был «заморожен» в противоположной фазе, когда тяготение сжимало плазму, а давление газа расширяло ее. В результате первая гармоника вызвала меньшие отклонения температуры, чем основная волна. Поэтому второй пик энергетического спектра ниже первого. По соотношению их высот можно оценить, как в ранней Вселенной соотносились сила гравитации и давление излучения. По имеющимся данным, ко времени рекомбинации плотности энергий барионов и фотонов были примерно одинаковыми и составляли около 5% современного критического значения. Это согласуется с результатами расчетов, основанных на изучении ядерных реакций синтеза легких элементов, протекавших в юной Вселенной. Однако в общей теории относительности утверждается, что тяготение в равной мере присуще и веществу, и энергии. Усиливались ли отклонения температуры гравитационным полем фотонов? Безусловно. Однако его воздействие уравнивалось другим фактором: после рекомбинации кванты реликтового излучения из более плотных областей теряли больше энергии, чем фотоны из менее плотных, поскольку им приходилось «выбираться» из более глубоких гравитационных ям. Речь идет об эффекте Сакса-Вольфа, который уменьшает амплитуду отклонений температуры КМФ, в точности компенсируя ее усиление полем тяготения света. В областях, которые были слишком велики и потому не подвержены акустическим колебаниям (их современные угловые размеры превышают 1°), отклонения температуры обусловлены исключительно эффектом Сакса-Вольфа. Поэтому, как это ни парадоксально, наиболее крупные горячие зоны на карте КМФ соответствуют менее плотным районам. Наконец, изучение КМФ позволяет оценить долю темного вещества во Вселенной. Гравитационного поля одних барионов недостаточно, чтобы модулировать отклонения температуры за пределами первого пика энергетического спектра. Чтобы гравитационные потенциальные ямы были достаточно глубокими, необходимо большое количество холодной темной материи. Измерив соотношения трех первых спектральных пиков, космологи установили, что ее плотность примерно в пять раз превышает плотность барионного вещества и составляет примерно 25% от нынешнего критического значения.

ПОРАЗИТЕЛЬНОЕ СОЗВУЧИЕ

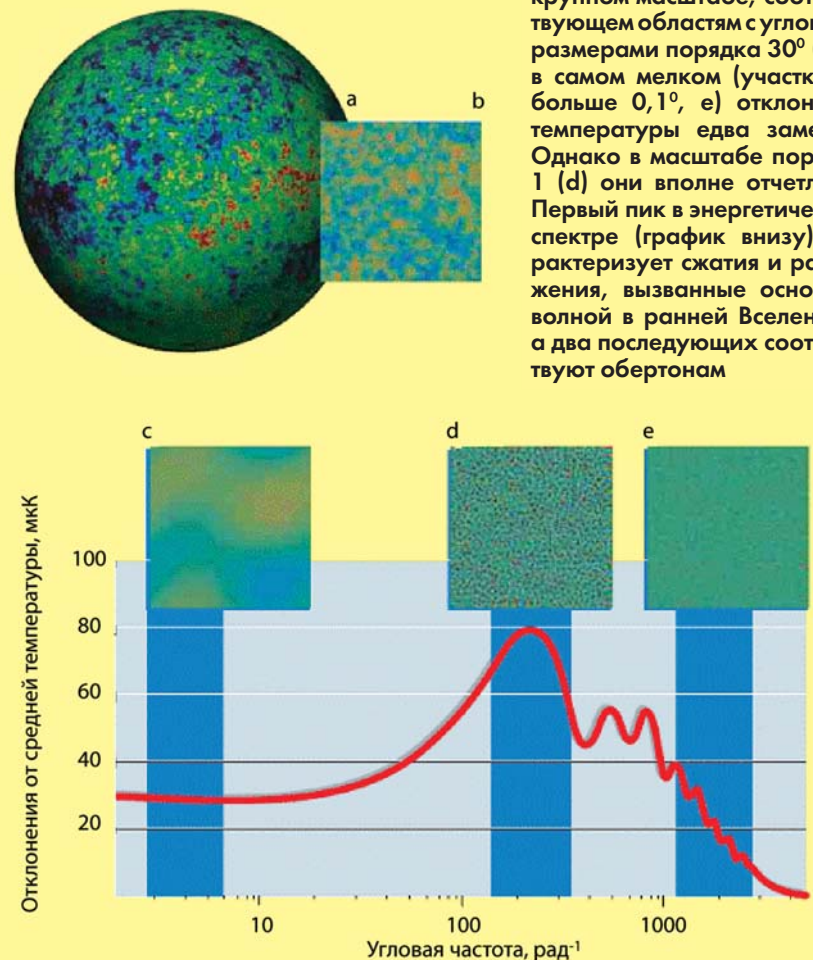
К сожалению, современное расчетное соотношение вещества и энергии оставляет неопределенной около 70% критической плотности. Для объяснения непонятого расхождения ученые постулировали существование таинственной темной энергии, влияние которой по мере расширения Вселенной росло (см. статью «Кто нарушил закон тяготения?»). Таким образом, мы приходим к невероятному выводу: сегодня Вселенная состоит в основном из темной энергии и невидимого темного вещества. Хуже того, плотность энергии темного вещества в настоящее время почему-то соизмерима с плотностью темной энергии, хотя при рекомбинации первая намного превышала вторую. А на раннем этапе развития Вселенной доминировало еще одно таинственное поле — инфлатон, которое и определило ее структуру. Почему же мы должны

полагаться на космологическую модель, основанную на гипотезе о существовании трех загадочных субстанций?

Во-первых, их существование позволяет объяснить множество известных фактов. Гипотеза о темном веществе впервые была выдвинута еще в 30-х гг. для объяснения местной плотности массы в скоплениях галактик. Концепцию темной энергии Альберт Эйнштейн ввел еще в 1917 г., включив в свои уравнения так называемую космологическую константу, компенсирующую влияние тяготения. Позднее он отказался от нее, но она была возрождена в 1990-х гг., когда при изучении далеких сверхновых выяснилось, что расширение Вселенной ускоряется. Оценка плотности энергии темного вещества и темной энергии по характеристикам КМФ удивительно хорошо совпадает с результатами астрономических наблюдений.

Во-вторых, описанная космологическая модель позволяет выдвигать перспективные гипотезы. В 1968 г. Джозеф Силк (Joseph Silk), работающий сегодня в Оксфордском университете, пришел к выводу, что высота акустических пиков в спектре КМФ должна убывать по определенному закону. При этом соответствующее излучение должно характеризоваться небольшой, но точно известной поляризацией. Казалось бы, КМФ не может быть поляризован, поскольку рассеяние фотонов в первичной плазме должно было привести к случайному распределению их ориентаций. Но в малых масштабах фотоны испытывают сравнительно немного соударений и сохраняют свою ориентацию, выражающуюся в поляризации КМФ. Ее удалось измерить интерферометром DASI (Degree Angular Scale Interferometer) на антарктической станции

Наблюдения реликтового излучения позволили построить карту отклонений температуры на всей небесной сфере (а). Для анализа ее участков (b) ученые использовали полосовые фильтры, чтобы определить, как изменяется температура излучения при разных пространственных масштабах. В крупном масштабе, соответствующем областям с угловыми размерами порядка 30° (с), и в самом мелком (участки не больше $0,1^\circ$, е) отклонения температуры едва заметны. Однако в масштабе порядка 1° (d) они вполне отчетливы. Первый пик в энергетическом спектре (график внизу) характеризует сжатия и разрежения, вызванные основной волной в ранней Вселенной, а два последующих соответствуют оборотам



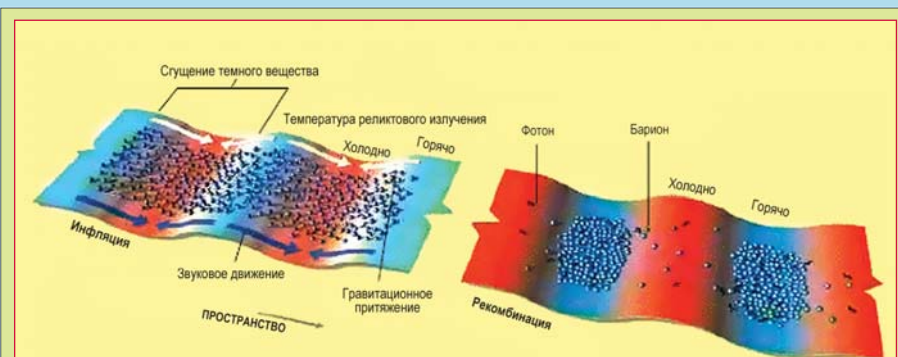
Амундсен-Скотт, а позднее и космическим аппаратом WMAP. Последний обнаружил также крупномасштабную поляризацию, обусловленную рассеянием фотонов после рекомбинации.

В-третьих, темная энергия ускоряет расширение Вселенной, за счет чего уменьшается глубина гравитационных потенциальных ям в местах галактических скоплений. Фотоны, пролетающие через такие области, получают энергетическую подпитку при падении в потенциальную яму. Выбравшись, они теряют меньше энергии, чем приобрели, поскольку глубина ямы к этому моменту оказывается меньше. Описанное явление, названное интегральным эффектом Сакса-Вольфа, привело к возникновению крупномасштабных вариаций температуры КМФ. Сопоставление результатов наблюдений крупных галактических структур с данными, полученными от WMAP, подтверждает эту гипотезу. Оценка количества темной энергии, необходимой для появления обширных температурных отклонений, совпадает со значениями, полученными при анализе энергетического спектра КМФ и взрывов далеких сверхновых.

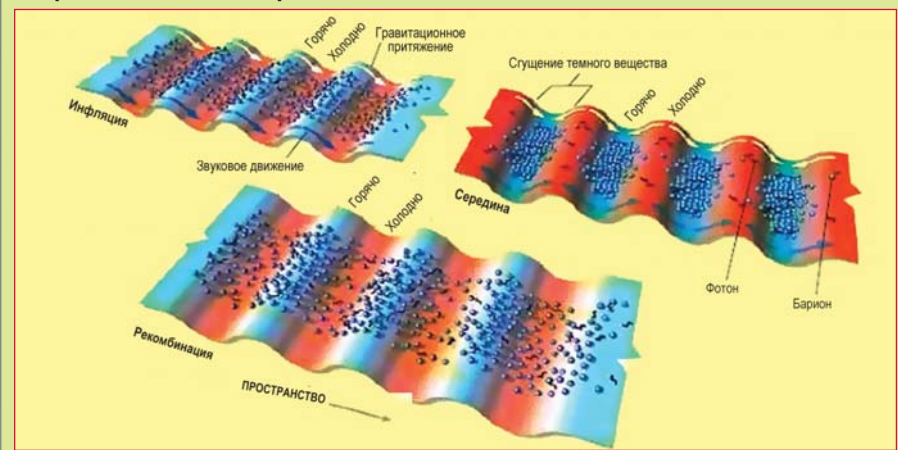
Мы пришли к невероятному выводу: Вселенная состоит в основном из невидимого темного вещества и темной энергии.

ЕЩЕ НЕ ВЕЧЕР

Реликтовое излучение несет в себе важную информацию о самых первых моментах после Большого взрыва. Результаты исследования КМФ заметно укрепили позицию самых простых моделей инфляции, согласно которым амплитуды начальных флуктуаций плотности были одинаковыми во всех масштабах. Однако если дальнейшие измерения покажут, что это было не так, то придется привлечь более сложные гипотезы и даже совершенно иные парадигмы. Чтобы больше узнать о физике инфляции, нужно определить, при каких энергиях она происходила. Когда Вселенная была горячее 10^{15} К, слабые ядерные и электромагнитные силы представляли собой разные аспекты одного и того же электрослабого взаимодействия. Если инфляция происходила при таких температурах, значит, инфлатон как-то связан с унификацией электрослабых сил. Однако она могла протекать при гораздо более высокой температуре, когда электрослабое взаимодействие смешивалось с сильным ядерным. В таком случае инфляция скорее всего имеет отношение к великому объединению фундаментальных сил. Кроме возбуждения флуктуаций плотности первичной плазмы инфляция породила пространственно-временные возмущения — гравитационные волны, длина которых соизмерима с размерами наблюдаемой Вселенной, а амплитуда пропорциональна квадрату температуры, при которой происходила инфляция. Отголоски гравитационных волн можно обнаружить в поляризации реликтового излучения. Особенно полезным может оказаться изучение эффекта Зельдовича-Сюняева, который обусловлен рассеянием фотонов КМФ горячим ионизованным газом в скоплениях галактик и позволяет идентифицировать их в критический период около 5 млрд. лет назад, когда



Влияние темного вещества модулирует акустические сигналы в реликтовом излучении. После инфляции области более высокой плотности темного вещества втягивают барионы и фотоны силами гравитационного притяжения (красные впадины). Ко времени рекомбинации, примерно через 380 тыс. лет после Большого взрыва, гравитационные силы и звуковое движение действовали совместно, повышая температуру во впадинах (синий цвет) и понижая ее на гребнях (красный цвет), что соответствует первому пику энергетического спектра



В меньших масштабах гравитационные силы и акустическое давление иногда действовали в противоположных направлениях. Сгустки темного вещества (второй пик в энергетическом спектре) максимизировали температуру во впадинах задолго до рекомбинации. После этого давление газа выталкивало барионы и фотоны из впадин (синие стрелки), а гравитационные силы пытались затянуть их обратно (белые стрелки). Такое противоборство уменьшало различие температур, что объясняет меньшую высоту второго пика спектра по сравнению с первым

темная энергия начала ускорять расширение Вселенной. Число скоплений галактик характеризует амплитуду тогдашних флуктуаций плотности. Не менее интересен эффект гравитационных линз, который возникает при прохождении фотонов реликтового излучения через сверхмассивные структуры, искривляющие их траектории и искажающие распределение отклонений температуры и поляризации. Величина линзового эффекта характеризует амплитуду флуктуаций плотности, связанных с этими образованиями. Однако для детального исследования инфляции и темной энергии ученым нужны КМФ-телескопы нового поколения, обладающие более высокими чувствительностью и разрешением. В 2009 г. Европейское космическое агентство запустило космическую микроволновую обсерваторию «Планк». «Планк» может выявлять различия температуры КМФ, составляющие всего $5 \cdot 10^{-6}$ К, и обнаруживать горячие и холодные пятна с угловыми размерами менее $0,1^\circ$. Такие измерения позволяют ученым бросить беглый взгляд на весь диапазон акустических осцилляций в КМФ и уточнить спектр инфляции. Хотя стандартная космологическая модель дает удивительно хорошее феноменологическое описание Вселенной, для более глубокого понимания ее тайн придется дожидаться результатов новых исследований.

