

# Космическая миссия «ПЛАНК»: предварительные результаты

М.В.Сажин, О.С.Сажина

**К**осмический радиотелескоп «ПЛАНК» («PLANCK») был построен и запущен в космос с целью исследовать анизотропию реликтового излучения. Прежде чем объяснить, почему эти наблюдения так важны для космологии, необходимо сказать несколько слов о самом реликтовом излучении.

## Свидетель глубокого прошлого

Уникальность *реликтового излучения* заключается в том, что внутри его источника находятся все наблюдатели во Вселенной. Любой наблюдатель находится в центре шара, ограниченного сферической поверхностью, откуда к нему и приходит реликтовое излучение. Эта граница — сферическая поверхность последнего рассеяния, которая практически совпадает с космологическим горизонтом частиц, ограничивающим видимую нам часть Вселенной. Радиус этой поверхности огромный, примерно 15 Гпк, с таких расстояний фотоны летят миллиарды лет. Поэтому она лежит в далеком прошлом нашей Вселенной, когда та была очень молода и горяча. Как известно из термодинамики, все тела с расширением охлаждаются. Расширяясь по инерции, заполненная



**Михаил Васильевич Сажин**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова.



**Ольга Сергеевна Сажина**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института.

Область научных интересов авторов — космология, теория относительности, астрометрия.

горячей плазмой Вселенная охладилась. В плазме в термодинамическом равновесии находились протоны, электроны и другие элементарные частицы. Одной из таких частиц был фотон. Наступил момент, когда плазма остыла настолько, что излучение оказалось отделенным от вещества: свободные протоны и электроны стали связываться в устойчивые атомы водорода, а фотоны — распространяться свободно. Вот этот момент (момент рекомбинации, или эпоха просветления) и зафиксирован на поверхности последнего рассеяния — появление первых свободно распространяющихся реликтовых фотонов, сечение взаимодействия которых с образовавшимся нейтральным водородом стало пренебрежимо мало. В начале своего путешествия их температура была очень высокой, примерно 3000 К, во время расширения Вселенной фотоны остывали, и сейчас Вселенная практически однородно заполнена микроволновым

© Сажин М.В., Сажина О.С., 2013

реликтовым фоновым излучением с температурой порядка 3 К. Такая разница температур обусловлена тем, что Вселенная успела расшириться, увеличив свой размер примерно в 1000 раз.

Важнейшим наблюдательным фактом стало открытие небольшой *анизотропии реликтового излучения* (неоднородности его распределения по небесной сфере порядка всего лишь долей процента от основного фона). Эта анизотропия несет важнейшую информацию об устройстве Вселенной вплоть до моментов времени, соответствующих красному смещению  $z = 1000$  (напомним, что самые далекие источники — ранние галактики — находятся от нас на расстояниях порядка  $z = 8$ ) и даже еще дальше, до планковских времен и энергий. Полученные пока данные подтверждают так называемую Стандартную космологическую модель\*, основу современной космологии, в разработке которой приняли большое участие советские и российские космологи: Я.Б.Зельдович, А.Д.Линде, В.А.Рубаков, А.А.Старобинский и др. Наблюдения анизотропии позволяют теоретикам работать над созданием Единой теории и отсеивать нежизнеспособные модели. О параметрах и характерных свойствах этой модели в свете анализа реликтового излучения речь пойдет ниже.

Механизм возникновения анизотропии реликтового излучения прост и нагляден. Удобнее всего ее представить как совокупность колебательных гармоник. Само исходное реликтовое излучение можно рассматривать как монопольную гармонику (имеющую однородное распределение по сфере). Самая низшая гармоника анизотропии, дипольная, обусловлена тем, что наблюдатель, находясь внутри поверхности последнего рассеяния, движется относительно нее. Из-за эффекта Доплера у фотонов реликтового излучения, догоняющих наблюдателя, длина волны смещена в красную сторону спектра, а у движущихся навстречу — в голубую. Далее, поверхность последнего рассеяния «дрожит», совершает колебательные движения, порождая колебания более высоких мультиполей.

Помимо этих колебаний есть еще несколько физических механизмов генерации анизотропии. Основные из них: эффект Сакса—Вольфе, возникающий при распространении фотона в неоднородном статическом гравитационном поле — при движении в сторону нарастания гравитационного потенциала фотон теряет энергию, испытывает красное смещение, и при движении по убывающему потенциалу, при «скатывании», фотон приобретает энергию и его длина волны смещается в голубую часть спектра; интегральный эффект Сакса—

Вольфе, аналогичный эффекту Сакса—Вольфе, но возникающий в переменных гравитационных полях; эффект Силка, порождаемый адиабатическими флуктуациями плотности, — флуктуация плотности материи приводит к флуктуации числа фотонов, т.е. где больше плотность, там горячее [2]. Для одного фотона описанные физические механизмы ведут к изменению частоты, для ансамбля реликтового излучения — к изменению температуры. Так, «ПЛАНК» измерил колебания вплоть до 2500-й гармоники, что соответствует очень малой «колеблющейся зоне» на небе, всего  $0.07^\circ$ , в то время как дипольная гармоника характеризует область размером в  $90^\circ$ .

Перед тем как говорить о самом проекте «ПЛАНК», необходимо вспомнить, какие аппараты по исследованию анизотропии реликтового излучения работали до него. Анизотропия была обнаружена в 1992 г. в результате обработки данных советского космического эксперимента «Реликт» [1]. Позже это открытие было надежно подтверждено американским аппаратом «COBE» и далее целой серией как наземных, так и космических миссий. Из последних следует прежде всего сказать о миссиях «WMAP» и «ПЛАНК». На аппарате «Реликт» был установлен всего один радиометр; отношение сигнала к шуму у него было невелико, порядка 3. На аппарате «COBE» измерения вели три радиометра, что позволило искать сигнал уже на трех независимых частотах; отношение сигнала к шуму было порядка 10. За открытие анизотропии реликтового излучения команда «COBE» была удостоена Нобелевской премии по физике в 2006 г.

Американским космическим аппаратом «WMAP» за девять лет наблюдений была получена важнейшая информация об анизотропии реликтового излучения. Удалось сформировать довольно четкую космологическую картину как качественную, так и количественную. Спутник «ПЛАНК» во многом подтвердил результаты «WMAP», а также смог дать более четкие ограничения на существующее многообразие теоретических моделей ранней Вселенной, на ее структуру и основные параметры. Результаты обработки данных были представлены в виде зависимости углового спектра анизотропии от мультипольного числа [1]. По виду этого спектра, по положению и амплитуде его пиков можно судить о величинах космологических параметров и, следовательно, о глобальных физических характеристиках нашей Вселенной.

## Новый взгляд нового спутника

Спутник «ПЛАНК» (рис.1) принадлежит Европейскому космическому агентству. Он предназначен для исследования ранней Вселенной, а именно для анализа микроволнового фонового реликтового излучения. Спутник был запущен 14 мая 2009 г.

\* О планковских временах и энергиях, а также подробно о процессах, происходивших в ранней Вселенной, можно прочитать в монографии С.Вайнберга [1], в учебнике Д.С.Горбунова и В.А.Рубакова [2], а также в популярной книге [3].

Высота спутника 4.20 м, ширина — 4.22 м, масса — 1.95 т, размеры зеркала — 1.9×1.5 м. Расчетное время жизни было оценено в 15 мес. В настоящее время спутник в нерабочем состоянии движется по эллиптической орбите. Операционная орбита — фигура Лиссажу, на среднем расстоянии от точки Лагранжа L2 в 400 000 км (рис.2). Окрестности точки Лагранжа L2 очень удобны для размещения космических аппаратов. Заметим, что идея отправлять космические миссии именно в эту точку принадлежала советским специалистам — идея оказалась настолько удачной, что, как шутят ученые, скоро в этой точке придется размещать светофор для регулирования становящегося все более интенсивным движения.

«ПЛАНК» — многочастотный инструмент. Он обладает двумя наборами радиоприемников. Доступный диапазон частот у 22 бортовых радиометров: 27—77 ГГц (что соответствует длинам волн от 11.1 до 3.9 мм) для низких частот (LFI). Регистрируемые частоты у имеющихся на борту 52 болометрических детекторов: 84 ГГц—1 ТГц (что отвечает длинам волн от 3.6 до 0.3 мм) для высоких частот (HFI).

Коротко остановимся на истории самого проекта. В 1993 г. на о.Капри (Италия) состоялась большая международная конференция, посвященная анизотропии реликтового излучения. На ней присутствовали основные участники этого эпохального открытия: И.А.Струков, М.В.Сажин, Дж.Смут. На волне энтузиазма и в силу исключительной важности новых данных для космологии европейская сторона предложила сразу два будущих больших проекта по исследованию анизотропии: «COBRAS» и «SAMBA». Последующее объединение этих проектов и породило европейский — франко-итальянский — эксперимент «ПЛАНК», в составе которого были ученые из Болонского университета (Istituto di



Рис.1. Космический аппарат «ПЛАНК».



Рис.2. Траектория аппарата «ПЛАНК» при выходе на расчетную орбиту.

Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica) в Италии и из французских университетов г. Орсе и Парижа (Institute d'Astrophysique Spatiale d'Orsay, Institute d'Astrophysique de Paris).

В марте 2013 г. сотрудники коллаборации «ПЛАНК» опубликовали в открытой печати предварительные результаты обработки данных — около 30 статей, посвященных различным космологическим и астрофизическим аспектам. Так, были построены карты космического микроволнового фона, карты Млечного Пути, карты распределения далеких внегалактических источников, каталоги компактных источников нашей и других галактик.

Важнейшей частью обработки данных было распознавание факторов разной природы, дающих вклад при построения карты фонового микроволнового излучения. Наблюдения на разных частотах позволили «отфильтровать» значительную часть синхротронного излучения, идущего от нашей Галактики (его интенсивность обратно пропорциональна кубу частоты), а также так называемое свободно-свободное излучение электронов. И наконец, было отделено излучение пыли. Обработанная (синтезированная) карта реликтового излучения представлена на рис.3.

Карта (проекция Мольвейде небесной сферы) была построена в системе «HEALPix» (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization). Система позволяет разбивать небесную сферу на зоны (пиксели и группы пикселей) одинаковой площади и перенумеровывать их удобным для дальнейшей обработки способом. Особенно эффективна она

для обработки больших массивов данных. Так, для спутника «WMAP» количество пикселей составляло 3 млн, а для аппарата «ПЛАНК» — уже 50 млн.

По синтезированной карте реликтового излучения был построен угловой спектр анизотропии (рис.4). При малых значениях мультиполей в данных как «WMAP», так и «ПЛАНК» наблюдается отклонение теоретической модели от реальных наблюдательных данных. Это различие носит название *cosmic variance*. Основное объяснение такого несоответствия заключается в том, что для каждого конкретного наблюдателя излучение поверхности последнего рассеяния характеризует какую-то одну конкретную реализацию случайного поля, которым была заполнена ранняя Вселенная (например, в простейших моделях — поля так называемого инфлатона, ответственного за инфляционную стадию ранней Вселенной), а потому, очевидно, меняется в зависимости от положения наблюдателя. Эту статистическую неопределенность можно было бы устранить только в том случае, если бы мы имели возможность наблюдать поверхность последнего рассеяния из множества точек, отстоящих друг от друга на большие (космологические) расстояния, что, к сожалению, невозможно. Еще одно вероятное объяснение — нетривиальная топология нашей Вселенной, хотя данные «ПЛАНК» практически исключили такие интересные и экзотические варианты, как многогранность (додекаэдр с отождествленными гранями) или тороидальность Вселенной на сверхбольших масштабах. Существует, наконец, объяснение

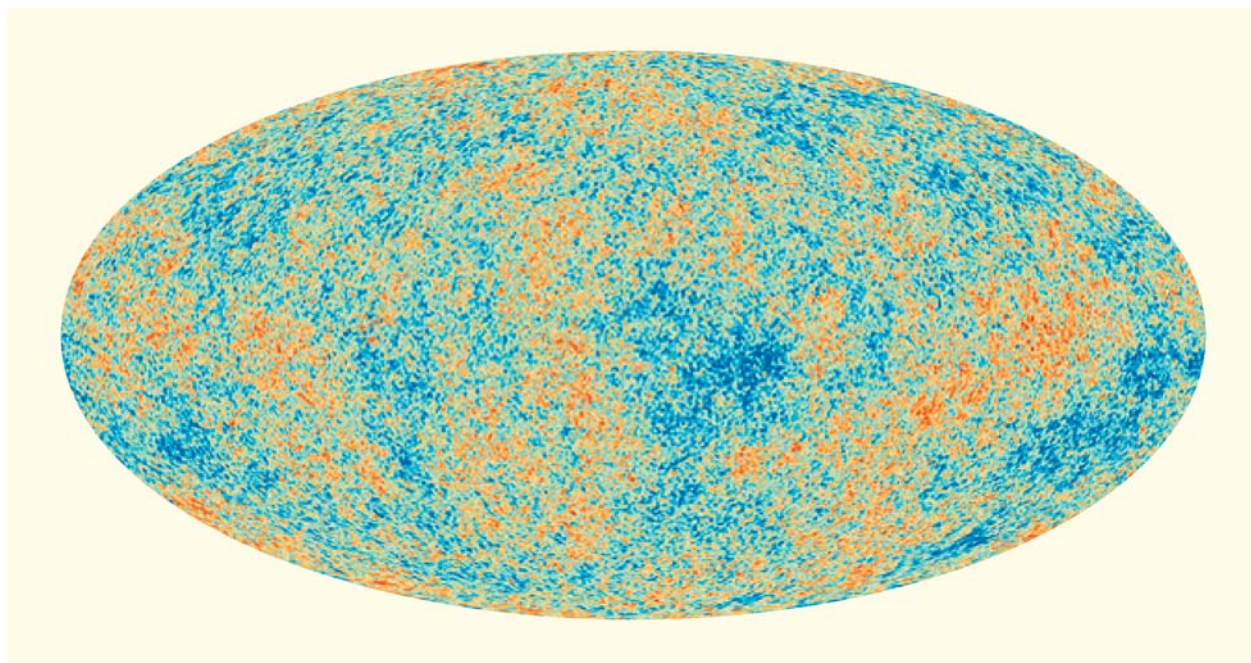


Рис.3. Карта микроволнового реликтового излучения, полученная в результате многочастотной обработки данных аппарата «ПЛАНК».

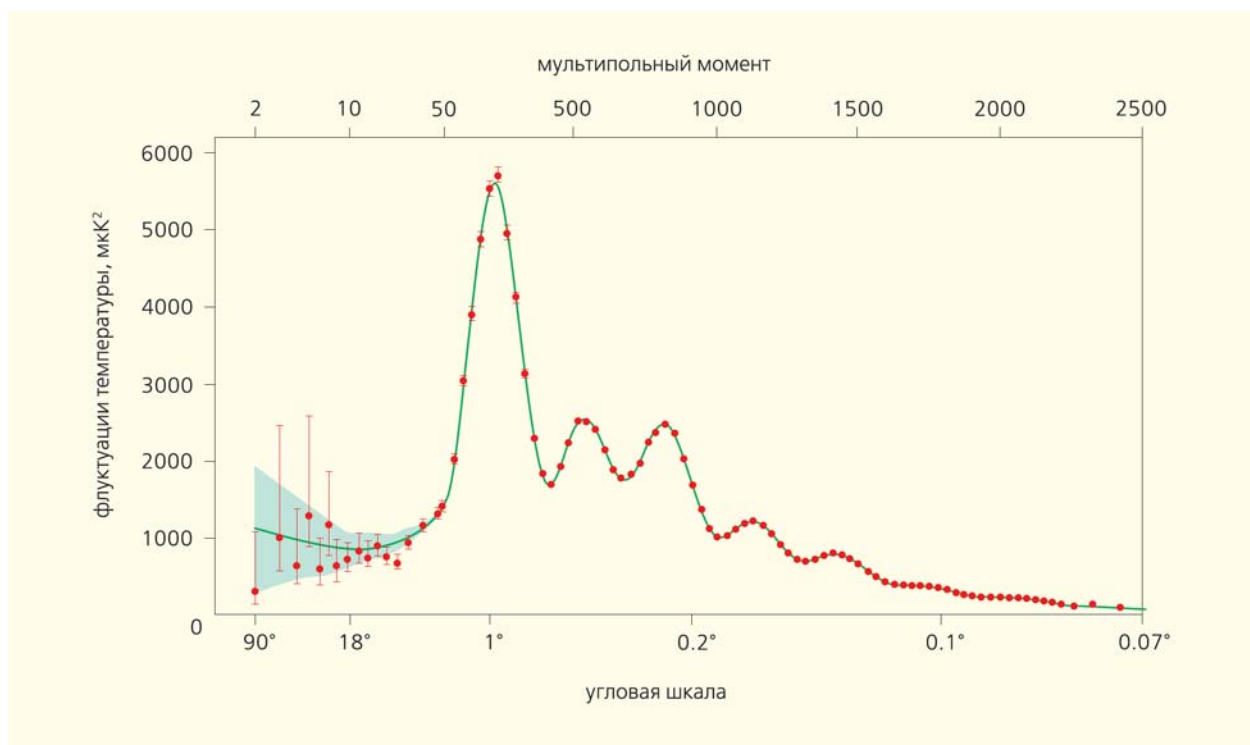


Рис.4. Угловой спектр анизотропии реликтового излучения, полученный аппаратом «ПЛАНК». Спектр показан в виде зависимости амплитуды «колебаний» поверхности последнего рассеяния от мультипольного числа и представляет собой разложение сигнала по сферическим функциям. По вертикальной оси отложены нормированные подходящим образом вращательно инвариантные величины мультиполей. Нормировка выбрана таким образом, чтобы подчеркнуть наличие плато Харрисона—Зельдовича для низких мультиполей. Непрерывная кривая — теоретическая Стандартная космологическая модель ( $\Lambda$ CDM). Точки — наблюдательные данные. Важно отметить точное согласование модели и данных наблюдений при больших мультиполях.

такого несоответствия теории с помощью топологических дефектов, прежде всего космических струн, о которых речь впереди.

### Коротко о главном

Из большого количества результатов, полученных в ходе предварительной обработки данных, можно выделить несколько наиболее важных.

Во-первых, была подтверждена Стандартная космологическая модель (так называемая  $\Lambda$ CDM-модель — от  $\Lambda$ -Cold Dark Matter) и существенно уточнены ее параметры. Это означает, что вплоть до поверхности последнего рассеяния теоретические представления современной космологии полностью подтверждаются наблюдательными данными. Напомним, что Стандартная космологическая модель — это пространственно-плоская модель нашей Вселенной, содержащая холодную (нерелятивистскую) темную материю и темную энергию. Параметры темной материи и темной энергии, согласно данным «ПЛАНК» составляют:  $\Omega_M = 26.8\%$ ,  $\Omega_\Lambda = 68.3\%$ . На долю обычного, барионного, видимого в телескопы вещества приходится

всего 4.9% от общей массы Вселенной (рис.5). Темная энергия представлена в модели в виде космологической постоянной, независящего от времени  $\Lambda$ -члена. Заметим сразу, что данные «ПЛАНК» все же допускают возможность непостоянства во времени параметра темной энергии, что может приводить к интереснейшим прогнозам относительно будущего нашей Вселенной (например, к существованию так называемой фантомной темной энергии, плотность которой, в отличие от постоянной плотности  $\Lambda$ -члена, растет с расширением Вселенной; в этом случае за конечное время Вселенная достигнет бесконечных размеров — горизонта событий не будет, но расстояние между гравитационно несвязанными галактиками в далеком будущем станет бесконечно большим).

Во-вторых, не было обнаружено никаких существенных отклонений анизотропии от гауссового распределения, что говорит об отсутствии хоть сколько-нибудь значительных экзотических структур в нашей Вселенной.

Не было обнаружено стерильных нейтрино (очень слабо взаимодействующих частиц, предположительно участвующих в процессах нейтринных осцилляций и являющихся одними из канди-

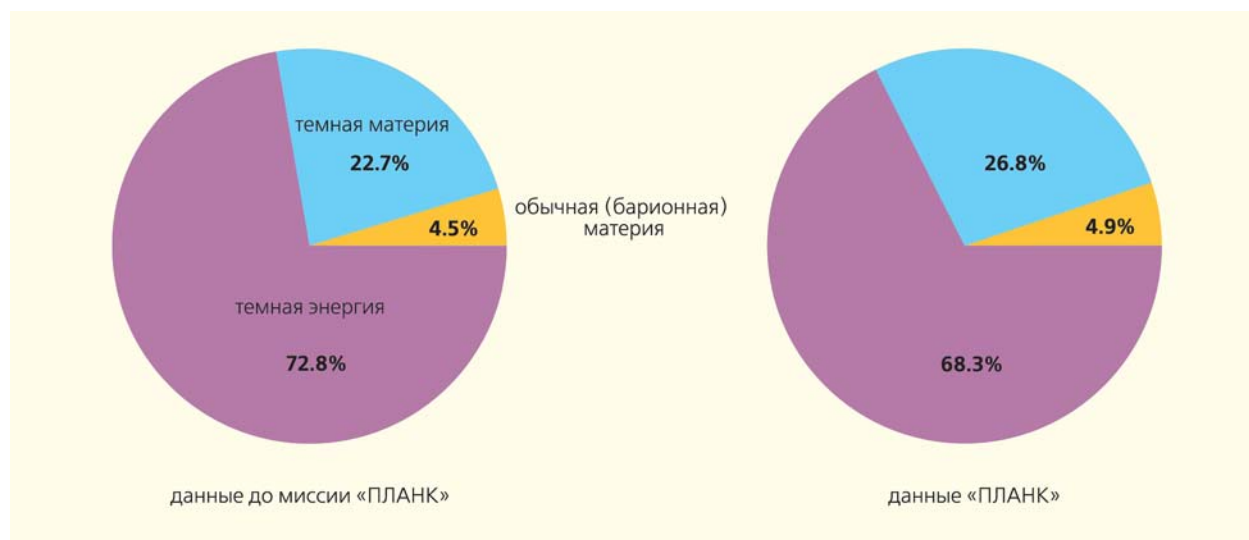


Рис.5. Сравнение основных космологических параметров, полученных в результате обработки данных девяти лет наблюдения аппарата «WMAP» (слева) и предварительной обработки данных аппарата «ПЛАНК».

датов в темную материю). Подтверждается модель о существовании только трех типов нейтрино.

Не было обнаружено космологических гравитационных волн. Об их наличии можно было бы судить в случае обнаружения так называемой В-моды поляризации реликтового излучения. Напомним, что Е- и В-моды (скалярная и псевдоскалярная части, или, иначе, четная и нечетная моды) есть способ представления тензора поляризации излучения. Эти моды, в отличие от известных характеристик излучения — параметров Стокса — инвариантны относительно преобразования координат. Кроме того, эти моды могут хорошо разделять типы возмущений (скалярные, векторные, тензорные). Так, скалярные возмущения генерируют только Е-моду, векторные — только В-моду, а тензорные — как Е-, так и В-моду. Гравитационные волны — это тензорные возмущения, а потому они должны с необходимостью содержать В-моду. Другим альтернативным источником этой моды могли бы быть космические струны. При предварительном анализе данных «ПЛАНК» В-моды обнаружено не было.

Удалось отсеять большой класс моделей инфляции (экспоненциального расширения) ранней Вселенной, ограничив с помощью наблюдений допустимые виды инфляционного потенциала. Однако в этом направлении предстоит еще много работы.

Было выявлено несогласование в определении параметра Хаббла по сверхновым типа Ia (кинематический параметр Хаббла) и по данным «ПЛАНК».

Исключены космологические модели с большими неоднородностями и пустотами («войдами»). По анализу эффекта Сюняева—Зельдовича составлен каталог кластеров и кандидатов в клас-

теры (в количестве около 1300). Составлен каталог компактных источников (звезд, пылевых облаков, звездных ядер, радиогалактик, блазаров, инфракрасных галактик, объектов межгалактического пространства). Измерена скорость и определено направление движения барицентра Солнечной системы относительно поверхности последнего рассеяния (369 км/сек). Установлено, что начальные возмущения были статистически однородны и гауссовы. Получено уточненное значение спектрального индекса. Обнаружен интегральный эффект Сакса—Вольфе, т.е. корреляция анизотропии реликтового излучения и гравитационных потенциалов, задающих крупномасштабную структуру Вселенной. Исследовано интегральное распределение масс вплоть до поверхности последнего рассеяния (гравитационное линзирование на крупномасштабных структурах). С большой точностью найдены космологические параметры: угловой размер звукового горизонта на эпоху рекомбинации, физическая плотность барионов и холодной темной материи, скалярный спектральный индекс, постоянная Хаббла, плотность вещества, число типов нейтрино, верхнее ограничение на сумму масс нейтрино всех типов.

### Существуют ли космические струны?

В заключение скажем несколько слов о космических струнах — предмете особенно тщательных поисков в последнее десятилетие. Интерпретация данных двух мощнейших аппаратов по исследованию анизотропии реликтового излучения, «WMAP» и «ПЛАНК», оставляет мало места для экзотических объектов. Однако они все-таки могут существовать, просто характеризующие их энергии не

должны быть слишком велики. В первую очередь речь идет о космических струнах. Согласно представлениям современной космологии, Вселенная расширялась и охлаждалась, проходя серию фазовых переходов, нарушающих симметрию. В разных точках пространства симметрия нарушалась по-разному, поэтому объединение таких разнородных участков в ходе расширения должно приводить к топологическим проблемам, в результате чего могут формироваться космические струны. Другими словами, последние представляют собой линейные области симметричного и высокоэнергетического вакуума, окруженного новыми областями, которые обладают уже меньшей симметрией и энергией (так называемая реликтовая темная энергия). Будучи топологически устойчивыми, они могут «дожить» до современных эпох. Данные «ПЛАНК» позволили получить ограничения на энергии таких объектов (было показано, что нет струн, энергии которых соответствуют энергиям теории Великого объединения,  $10^{16}$  ГэВ) — иначе говоря, сверхтяжелые струны обнаружены не были. Однако за основу моделирования космических струн брался тот факт, что эти объекты представляют собой сеть, равномерно распределенную по всей Вселенной, в то время как таких объектов может быть очень мало, а их энергии могут быть меньше.

Очень важной характеристикой ранней Вселенной стали данные по поляризации анизотропии реликтового излучения, однако в предварительных результатах «ПЛАНК» они полностью представлены не были.

Напомним, что фоновое реликтовое излучение не поляризовано. Однако его анизотропная часть обладает линейной поляризацией, которая возникает за счет комптоновского рассеяния анизотропного потока реликтовых фотонов на свободных электронах (линейна она потому, что дифференциальное сечение комптоновского рассеяния на покоящихся электронах зависит от поляризации начального и конечного фотонов).

Степень поляризации пропорциональна анизотропии реликтового излучения с коэффициентом, меньшим единицы. Так, амплитуда поляризации зависит от угловых масштабов соответствующих неоднородностей на карте анизотропии реликтового излучения и оказывается малой величиной, от одного до сотых долей микрокельвина.

Итак, теперь мы знаем, что космические струны — не основной источник анизотропии реликтового излучения. Однако они могут давать характерный спектр поляризации реликтового излучения — в частности, активно генерировать постинфляционную В-моду поляризации, что совместимо с моделями гибридной инфляции и с инфляцией на бране. Последнее означает моделирование инфляции в рамках современных многомерных теорий, согласно которым существует многомерное объемлющее пространство и в нем расположены гиперповерхности (браны), также могут обладать различными размерностями. Движения и взаимодействия бран теоретически и могут порождать космические струны — протяженные локализованные объекты, служащие непосредственными источниками возмущений. Сеть космических струн на протяжении своей эволюции активно возмущает фоновую метрику, равно генерируя скалярные, векторные и тензорные возмущения. Так, амплитуда векторных возмущений значима и сравнима со скалярными возмущениями, инфляционные же возмущения векторных мод не содержат. Тензорные возмущения могут генерировать как космические струны, так и космологические гравитационные волны, оценка их соответствующих вкладов представляется затруднительной. Кроме того, многие модели предсказывают преобладание скалярных мод над тензорными. Таким образом, струны являются хорошим альтернативным источником генерации В-моды. Шум «ПЛАНК» составляет около  $0.003 \text{ мК}^2$  (для сравнения: шум «WMAP»  $0.01 \text{ мК}^2$ ), что позволило бы выявлять как вклад космических струн, так и космологических гравитационных волн. ■

## Литература

1. *Вайнберг С.* Космология / Пер. с англ. К.Б.Алкалаева, В.Э.Подобеда, А.В.Беркова. М., 2013.
2. *Горбунов Д.С., Рубаков В.А.* Введение в теорию ранней Вселенной: В 2-х т. М., 2010.
3. *Сажин М.В.* Современная космология в популярном изложении. М., 2002.