

УДК 524.82

РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И СОВРЕМЕННАЯ КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

© 2021 г. **О. В. Верходанов**

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

E-mail: vo@sao.ru

Поступила в редакцию 31.07.2020 г.

После доработки 30.10.2020 г.

Принята к публикации 30.10.2020 г.

В обзоре рассмотрен вклад результатов измерения флуктуаций реликтового излучения в современную космологическую модель и последние результаты наблюдательной космологии. Мы обсудили основы современной космологической модели, этапы получения информации из данных наблюдений обсерватории “Planck”, а именно, анализ временных рядов наблюдений, процедуры построения карты, пикселизацию, разделение фоновых компонентов, расчет углового спектра мощности и определение космологических параметров.

DOI: 10.31857/S0004629921030051

1. ВВЕДЕНИЕ

Начало эпохи точной космологии можно отсчитывать от даты публикации первых результатов по измерению уровня неоднородностей космического микроволнового фона (СМВ) в миссии WMAP НАСА в 2003 г., когда космологические параметры были измерены с точностью лучше 10% [1]. Последующие релизы данных WMAP, а также релизы данных запущенной в 2008 г. обсерватории “Planck” Европейского космического агентства (ESA) [2–6] подтвердили первые полученные результаты и продемонстрировали прежде недостижимое на других инструментах качество космологических измерений. Существенного прорыва удалось достичь благодаря полному картографированию всей небесной сферы и высокой чувствительности обзора одновременно в нескольких полосах микроволнового диапазона. Эти данные привели к целому ряду первостепенных астрофизических результатов.

Уже в самых ранних работах о существовании космического микроволнового излучения [7–9] и, естественно, сразу после открытия СМВ [10, 11] модель горячей ранней Вселенной стала преобладающей, а астрофизика встала на путь прямого измерения космологических параметров. Десятки наблюдательных экспериментов и сотни теоретических работ (см. обзор в [12]) дали толчок развитию самой модели, пока на спутнике НАСА COBE [13] не были открыты неоднородности на угловом масштабе около 7° .

Открытие флуктуаций реликтового излучения определило направления, по которым необходи-

мо было двигаться для точного измерения космологических параметров. Это прежде всего измерения анизотропии температуры РИ на субградусных и меньших масштабах, а также измерения поляризации СМВ в Е и В модах. Кроме того стало ясно, что для расчета сферических и вращательных гармоник требовались наблюдения на полной небесной сфере.

Продолжительные космические обзоры реликтового фонового излучения (РИ), дополненные данными разных экспериментов в других диапазонах волн, привели к построению согласованного описания Вселенной. Эти отмеченные выше ключевые обзоры полного неба есть: WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) НАСА и “Planck” ESA по измерению уровня флуктуаций температуры и поляризации космического микроволнового фона. Оба спутника были запущены в квазистабильную точку Лагранжа L2 в системе двух тел Солнце–Земля на расстоянии 1.5 млн. км от Земли в направлении от Солнца. Сканирование неба телескопом НАСА WMAP¹ проводилось в период с 2002 по 2011 г. в пяти полосах: 23 (полоса K), 33 (полоса Ka), 41 (полоса Q), 61 (полоса V) и 94 ГГц (полоса W). Европейское космическое агентство реализовало свой проект “Planck”². Он был направлен на решение почти тех же задач, но являлся экспериментом нового поколения, превосходящим все прежние эксперименты по чувствительности, угловому разрешению и числу ча-

¹ <http://lambda.gsfc.nasa.gov>

² <http://www.esa.int/“Planck”>

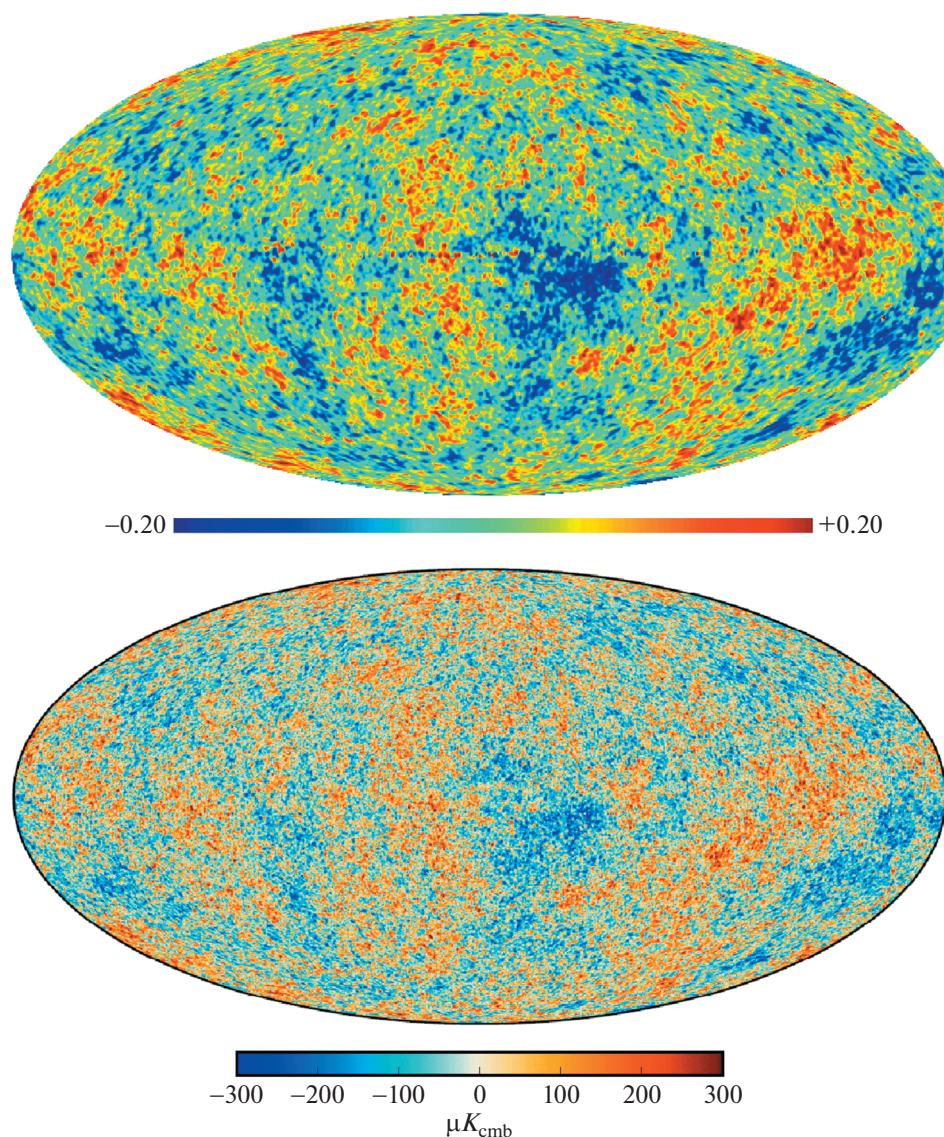


Рис. 1. Верхняя панель – карта СМВ WMAP 9-го релиза с угловым разрешением 1° . Нижняя панель – карта СМВ “Planck” релиза данных 2015 г. с разрешением $5'$.

стотных полос. На рис. 1 приведены карты обзоров WMAP и “Planck”.

Результаты измерений СМВ в этих обзорах, данные по сверхновым типа СН Ia [14, 15], барионным осцилляциям BOSS [16] и первичному нуклеосинтезу [17] позволили перейти к точным измерениям космологических параметров в рамках Λ CDM-космологии. Важнейшей поддержкой космическим экспериментам стали численные симуляции эволюции крупномасштабной структуры на современных мощных суперкомпьютерах [18–20].

В данном обзоре мы рассмотрим следующие вопросы: на чем базируется современная космологическая модель, этапы получения информации по стандартной модели из данных наблюдений

обсерватории “Planck”, которые включают анализ временных рядов наблюдений, процедуры построения карты, пикселизацию, разделение фоновых компонентов, расчет углового спектра мощности и определение космологических параметров. Далее мы обсудим основные космологические результаты и такой важный вопрос, как согласование данных эксперимента “Planck” с целым набором разнообразных космологических измерений.

2. ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ И РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Современная космологическая модель (или стандартная космологическая модель) Λ CDM

призвана описать особенности эволюции Вселенной в различные эпохи конечным количеством параметров. Модель строится на результатах наблюдательных экспериментов, в которых определяются несколько параметров. Исходя из этой модели удается сделать предсказания для проверки в экспериментах следующего поколения. В самом названии современной модели заключены две главные проблемы современной космологии. Первая проблема – темная энергия (ТЭ), описывается Λ -членом в уравнении Эйнштейна. Ее действие наблюдается на масштабах сотен миллионов световых лет как ускоренное расширение Вселенной. ТЭ – это некоторая субстанция с отрицательным давлением и ее часто соотносят со свойствами вакуума. Второй компонент модели – темная материя (ТМ), гравитационное проявление которой мы видим на масштабах галактик, скоплений галактик и крупномасштабной структуры Вселенной. Темная материя представляется в стандартном описании как холодная темная материя (Cold Dark Matter – CDM). Скорее всего, ТМ – это вещество, состоящее из массивных нейтральных частиц, не входящих в Стандартную модель физики элементарных частиц и не участвующих в электромагнитном взаимодействии. Но, возможно, что кроме гравитационного взаимодействия ТМ может участвовать в слабом, либо в другом, пока неизвестном взаимодействии. Вклад обоих компонентов в энергетический баланс Вселенной хорошо измерен по их проявлениям. В рамках согласованной модели, использующей данные космической миссии “Planck” релиза 2018 г. и барионных (акустических или Сахаровских) осцилляций, измеренных в оптических наблюдениях Слоановского обзора неба [21, 22] (Sloan Digital Sky Survey – SDSS), вклад составляет ~69% ТЭ и ~26% ТМ. При этом за ~5% энергии отвечает видимое (барионное) вещество.

Простейшая модель Λ CDM содержит шесть базовых параметров, среди которых параметры плотности, параметры, описывающие рост первичных неоднородностей вещества, и оптическая толща в эпоху реионизации, связанная с эпохой образования первых звезд. Ниже (см. [1, 6]) мы остановимся на более детальном рассмотрении этих параметров. Обсудим различные космологические эпохи, в рамках действующей модели, которые в той или иной степени нашли отражение в анизотропии температуры и поляризации СМВ.

Современная стандартная космологическая модель позволяет описать эволюцию Вселенной в виде нескольких стадий [23–26], в течение которых ее физические свойства кардинально различаются.

Очень ранняя Вселенная (Большой взрыв) включает Планковскую эпоху до 10^{-37} с от зарождения

Вселенной с температурой примерно 10^{32} К и плотностью около 10^{93} г/см³; эпоху быстрого (экспоненциального) раздувания Вселенной за первые 10^{-35} – 10^{-32} с в зависимости от модели, называемую космической инфляцией; эпоху нарушения соотношения между материей и антиматерией (10^{-11} с, 10^{16} К). В эту эпоху, как предполагается, возникли усиленные инфляцией скалярные возмущения и связанные с первичными гравитационными волнами тензорные возмущения поля.

Ранняя Вселенная включает эпоху разделения взаимодействий (10^{-6} с, 10^{13} К); охлаждение кварк-глюонной плазмы и появление протонов и нейтронов; аннигиляцию частиц и античастиц (от 10^{-5} с для протонов и антипротонов до 10 с после Большого взрыва для электронов и позитронов) и эпоху доминирования излучения, когда в энергетическом балансе Вселенной преобладали фотоны, возникшие после аннигиляции антиматерии и активно взаимодействующие с заряженными частицами в первичной плазме. Спустя 380 тыс. лет, испытав множественные поглощения и переизлучение в плазме, эти фотоны после рекомбинации водорода, называемые реликтовым излучением, начнут свободно распространяться по Вселенной. К этому же этапу относится эпоха первичного нуклеосинтеза: рождение ядер дейтерия и гелия из свободных нейтронов и протонов при охлаждении температуры до 10^{10} К через 200 с после Большого взрыва. Спустя 40–70 тыс. лет, когда плотности излучения и материи сравнялись, из квантовых неоднородностей, возникших еще во время космической инфляции, за счет гравитации и давления начали образовываться первые структуры в молодой Вселенной. Эволюция таких структур, процесс формирования которых был предсказан А.Д. Сахаровым [27], описывается физикой акустических волн в плазме. Свойства первичной плазмы, определяемой всеми компонентами плотности энергии, а также другими физическими параметрами, такими, например, как скорость расширения Вселенной или количество энергии в волнах разной длины, оказываются связаны с излучением, оставшимся от аннигиляции материи и антиматерии. Возникшие неоднородности в распределении материи в эту эпоху не являются стабильными: часть из них разрушается, а часть “выживает”, причем из выживших выделяются структуры определенного размера, и именно они распределяются в пространстве. Согласно современным представлениям, при образовании флуктуаций плотности материи в этот период основным гравитирующим компонентом является холодная темная материя. Фотоны, взаимодействуя с веществом, изменяли свою энергию соответственно, отпечатывая флуктуации плотности как наблюдаемые флуктуации температуры и поляризации СМВ.

Спустя 380 тыс. лет после Большого взрыва расширение Вселенной привело к понижению температуры до ~ 3000 К. В результате стало возможным существование стабильных, не разрушаемых излучением, атомов водорода. Этот период называется эпохой рекомбинации водорода. С тех пор излучение свободно проходило сквозь вещество, сохраняя в своем угловом распределении информацию о свойствах первичных возмущений плотности. Процесс рекомбинации приходится на период доминирования материи (так называемая *пылевая стадия расширения* или эпоха доминирования вещества), продолжавшийся около 6 млрд. лет до эпохи ускоренного расширения Вселенной (*стадия доминирования темной энергии*), начавшейся 6.5 млрд. лет назад и время окончания которой неизвестно. Во время пылевой стадии выделяются темная эпоха (от 380 тыс. лет до ~ 200 –400 млн. лет после Большого взрыва), когда не существовали крупные структуры, которые можно было бы сейчас наблюдать, и эпоха реионизации (от 0.4 до 1 млрд. лет), во время которой ультрафиолетовое излучение первых звезд и ядер галактик ионизировало нейтральный водород межгалактической среды. На стадии реионизации образуются галактики и их системы (группы и скопления). Эти процессы отражаются в фоновом излучении из-за взаимодействия фотонов со вторично ионизованным веществом и в изменении энергии фотонов в переменном гравитационном потенциале (так называемый интегральный эффект Сакса-Вольфа [28]), когда формируются скопления галактик и пустоты между ними. На стадии доминирования темной энергии (т.е. в нашу эпоху) скопления галактик оставляют свои отпечатки в распределении микроволнового фона за счет передачи энергии от быстрых электронов скопления фотоном (обратный эффект Комптона). Для межгалактического газа в скоплениях галактик эффект был теоретически рассчитан Зельдовичем и Сюняевым [29] на основании уравнения Компанейца [30] и многократно подтвержден в наблюдениях на ряде телескопов миллиметрового диапазона, и, в первую очередь, в миссии “Planck” и на Атакамском космологическом телескопе (АСТ).

Флуктуации температуры реликтового излучения зарегистрированы на уровне $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ [13]. В распределении реликтового излучения наблюдается также и дипольный компонент, в виде уярчения фона в направлении движения Земли и ослабления в противоположном направлении на уровне $\Delta T/T \sim 10^{-3}$. Эта анизотропия возникает из-за движения местного скопления галактик (вместе с Галактикой и Солнечной системой).

Различные процессы, происходившие во Вселенной фактически от эпохи инфляции до наших дней, нашли отражения в неоднородностях тем-

пературы и поляризации космического микроволнового фона. Среди наиболее важных и эффективно применяемых в современных численных моделях РИ для разных этапов существования Вселенной можно выделить следующие процессы:

- в дорекомбинационную эпоху:
 - возникновение флуктуаций с некоторыми начальной амплитудой и скоростью роста неоднородностей распределения вещества, содержащего барионную и темную материю (в рамках построения скалярной моды возмущений);
 - распределение флуктуаций в пространстве;
 - генерирование неоднородностей при существовании тензорной моды возмущений, обусловленной первичными гравитационными волнами, и наблюдаемой в В-моды поляризации СМВ (в рамках теории инфляции);
 - синтез первичного гелия;
- в пострекомбинационную эпоху:
 - реионизацию водорода от ультрафиолетового света первых звезд, изменение прозрачности среды, взаимодействие ионизированного водорода с фотонами СМВ, и генерирование Е-моды поляризации СМВ;
 - действие эффекта Сакса-Вольфа [28], который приводит к изменению частоты фотонов в меняющемся гравитационном потенциале формирующихся скоплений галактик и растущих войдов;
 - действие теплового эффекта Зельдовича–Сюняева [29], перераспределяющее фотоны СМВ по энергиям из миллиметрового в субмиллиметровый диапазон, благодаря обратному эффекту Комптона при рассеянии фотонов на горячих электронах скоплений;
 - действие кинематического эффекта Сюняева–Зельдовича [31], вызванное движением скопления галактик сквозь СМВ.

Таким образом, различные физические условия, существовавшие в разные эпохи эволюции Вселенной, привели к искажениям реликтового фона, которые мы сейчас наблюдаем на различных угловых масштабах. Угловые масштабы на небесной сфере задаются числом – номером мультиполя ℓ , обратно пропорциональным угловому размеру ω . Если мы представим влияние различных физических процессов, приводящих к возникновению флуктуаций фона, в виде функции, то ее можно определить как зависимость энергии, приходящей с неба, от заданного углового масштаба. Такую зависимость называют угловым спектром мощности и обозначают C_ℓ . Наряду с угловым спектром мощности анизотропии РИ также измеряют спектры мощности линейной поляризации и кросс-корреляционные спектры, которые являются независимыми тестами при определении космологических параметров. На

рис. 2 показаны карта РИ “Planck” и угловые спектры мощности C_ℓ^{TT} , C_ℓ^{TE} и C_ℓ^{EE} .

С учетом условий формирования искажений фона, можно сказать, что C_ℓ является функцией космологических параметров: $C_\ell = C_\ell(\Omega_b, \Omega_{\text{CDM}}, \Omega_\Lambda, H_0, \dots)$, Ω_b – плотность видимой (барионной) материи по отношению к критической плотности, Ω_{CDM} – относительная плотность холодной темной материи, Ω_Λ – относительная плотность темной энергии, H_0 – постоянная расширения Хаббла. Еще имеется ряд других параметров.

2.1. Современные эксперименты по измерению уровня неоднородностей СМВ

Свыше сотни экспериментов по поиску и исследованию флуктуаций РИ на различных угловых масштабах были проведены за всю историю астрономических исследований [12]. Наиболее существенные выполнены в этом веке. Здесь следует отметить следующие эксперименты: DASI [33], CBI [34], BOOMERanG [35], а также проводившиеся в CAO РАН исследования микроволнового фона в сантиметровом диапазоне [36, 37].

Остановимся на первых отмеченных наземных экспериментах, которые подтвердили некоторые космологические прогнозы. Интерферометр на градусных угловых масштабах DASI (Degree Angular Scale Interferometer) представляет собой 13-элементный интерферометр, созданный для анизотропии температуры и поляризации СМВ в большом диапазоне угловых масштабов с высокой чувствительностью и установленный Чикагским университетом на станции Амудсена–Скотта на Южном полюсе. В инструменте используются охлаждаемые усилители НЕМТ, работающие в частотном диапазоне 26–36 ГГц. Кроме подтверждения и измерения флуктуаций СМВ на высоких гармониках (мультиполи $\ell > 500$), DASI доказал существование Е-моды поляризации СМВ [33], и измерил поляризационный кросс-спектр.

Инструмент для построения изображений космического фона CBI (Cosmic Background Imager) 13-элементный интерферометр (как и DASI) с параболическими антеннами диаметром 0.9 м на 6-метровой платформе был установлен международной коллаборацией университетов на высоте 5080 м в обсерватории Чахнантор (Chajnantor Observatory) возле Сан Педро де Атакама в Чилийских Андах. Интерферометр начал наблюдения в 1999 г. и работал до 2008 г. (с улучшенными характеристиками с 2006 г., в том числе с увеличенным диаметром антенн до 1.4 м). Полоса частот – 26–36 ГГц. CBI измерял три моды поляризации I , Q , U . Задача CBI – наблюдения нескольких участков неба в микроволновом диапазоне для построения углового спектра мощности на масштабах от $5'$ до

1° (диапазон мультиполей $300 < \ell < 3000$). CBI надежно определил второй, третий и четвертый пики спектра мощности [34].

Среди аэростатных экспериментов, таких как BOOMERanG, MAXIMA, Archeops и др., BOOMERanG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics – аэростатные наблюдения миллиметрового внегалактического излучения и для геофизики), с нашей точки зрения, является наиболее эффективным при учете мешающих фоновых компонентов. Наблюдения BOOMERanG проводились на высоте 37 км над Антарктидой около 12 дней (с декабря 1998 по январь 1999 г.) и в 2003 г. Полет аэростата поддерживался стабильным полярным вихревым ветром вокруг Южного полюса, действие которого и дало название эксперименту. В наблюдениях использовались 1.2-м зеркало и 16-рупоров приемников на фокальной плоскости для регистрации в трех частотных полосах: 145, 245 и 345 ГГц [35]. При полете 2003 г. в BOOMERanG был установлен прототип поляризационного приемника “Planck” HFI на частоте 143 ГГц. К основным результатам эксперимента следует отнести подтверждение существования темной энергии и плоской геометрии Вселенной, построение карты, а также измерение поляризации СМВ (Е-мода) по данным поляризационных наблюдений второго запуска.

Главный прорыв в точности измерения космологических параметров по данным реликтового излучения был совершен при построении полных карт анизотропии температуры и поляризации СМВ в космических миссиях.

Миссия WMAP (рис. 3) была разработана для определения геометрии, состава и эволюционных свойств Вселенной в результате картографирования СМВ с разрешением $13'$. Орбита спутника (обращение вокруг точки Лагранжа L2 в системе Солнце–Земля), стратегия наблюдений и дизайн зонда выбраны так, чтобы получить некоррелированный пиксельный шум, минимальные систематические ошибки и точную калибровку. Наблюдения в миссии WMAP проводились с 2001 по 2010 г. в пяти частотных полосах: 23 (K), 33 (Ka), 41 (Q), 61 (V), и 94 ГГц (W), причем в полосах K и Ka использовались два радиометра, в Q и V – четыре, в W – восемь. Массивы данных по итогам 1, 3, 5, 7 и 9 лет работы миссии представлены и открыты астрономическому сообществу для использования [1–4]. По результатам анализа данных подготовлена карта анизотропии с разрешением $\ell \leq 100$ (рис. 1), построен угловой спектр мощности СМВ с $1 \leq \ell \leq 600$ для анизотропии температуры и поляризации. Независимо определены все основные космологические параметры с высокой точностью, недостижимой прежде в других экспериментах [38]. Кроме того, подготовлены карты распределения анизотропии и поля-

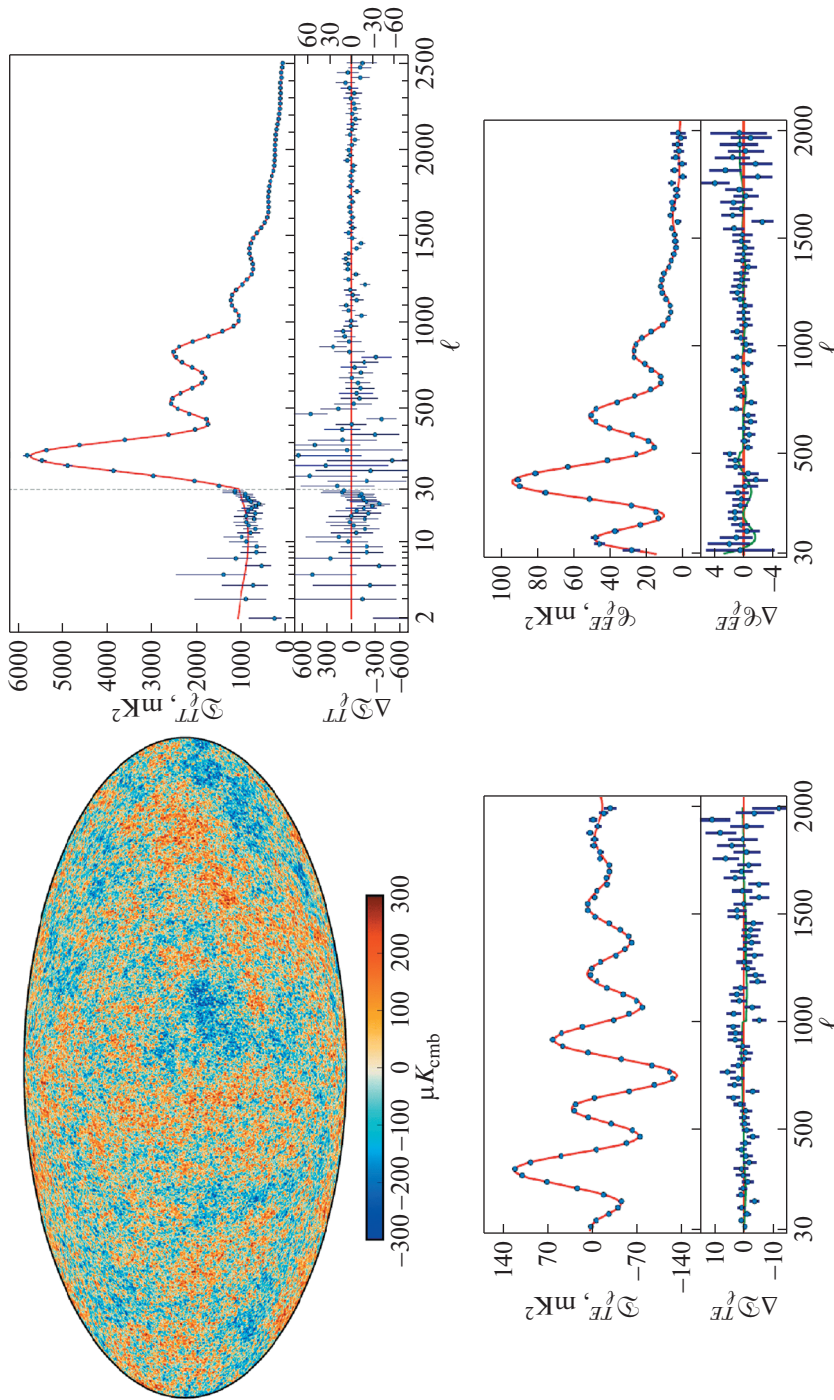


Рис. 2. Верхняя панель: слева — наиболее вероятная карта анизотропии температуры СМВ с разрешением 5', полученная в результате совместного анализа наблюдений “Planck”, WMAP и данных на частоте 408 МГц. Центральная узкая полоска в Галактической плоскости заполнена построенной реализацией модельной температуры СМВ с такими же статистическими свойствами, как и остальное небо; справа — в верхней части фрагмента приведен угловой спектр мощности C_ℓ^{TT} по данным релиза 2015 г. миссии “Planck”. На спектр наложена теоретическая кривая в космологической модели Λ CDM, соответствующая наилучшим образом данным анизотропии “Planck”. TT и низкий мультиполям поляризации. Невязки между спектром и теоретической кривой показаны в нижней части фрагмента. Уровни ошибок отмечены $\pm 1\sigma$ -барями. Нижняя панель: слева и справа приведены спектры мод поляризации TE и EE соответственно, построенные по данным “Planck”. Сплошная кривая отражает теоретическое поведение спектров в Λ CDM, полученной по анизотропии температуры. В нижней части фрагментов приведены невязки между измерениями и теоретическими расчетами. Бары ошибок показывают $\pm 1\sigma$ отклонения в модели, возникающие из-за различия в независимой подгонке спектров TT и отдельно TE с EE. Взято из работы [32].

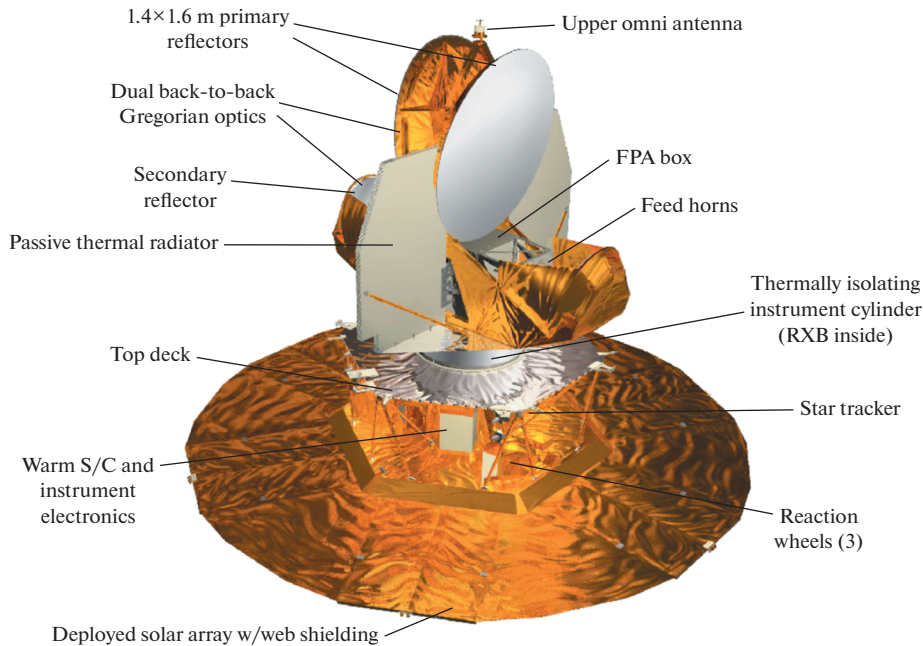


Рис. 3. Космический зонд WMAP. Рисунок воспроизведен из Википедии (<https://wikipedia.org/wiki/WMAP>).

ризации СВВ, фоновых компонентов (синхронного и свободно-свободного излучений, излучения пыли), а также рассчитаны их спектры мощности.

Следующая космическая миссия по исследованию РИ выполнена с помощью обсерватории “Planck” Европейского космического агентства. Спутник “Planck” был построен в космическом центре в Каннах-Манделье (Cannes Mandelieu Space center) (рис. 4).

Спутник был оснащен внеосевым телескопом системы Грегори, содержащим два параболических зеркала. Главное зеркало имеет размеры 1.9×1.5 м, а вторичное — 1.1×1.0 м. На спутнике был установлен набор из 74 приемных устройств, регистрирующих сигнал в частотном диапазоне между 25 и 1000 ГГц (миллиметровые и субмиллиметровые волны). С помощью этих приемников проводилось одновременное сканирование неба с угловым разрешением от $30'$ на низких частотах и до $5'$ на высоких частотах.

Приемники разделялись на две группы, которые называются соответственно низкочастотным инструментом (Low Frequency Instrument — LFI), включающим радиометры в полосах частот, центрированных на 30, 44 и 70 ГГц, и высокочастотным инструментом (High Frequency Instrument — HFI), содержащим болометры, принимающие радиоизлучение в полосах с центральными частотами 100, 143, 217, 353, 545 и 857 ГГц. В LFI использованы транзисторы с высокой электронной мобильностью (HEMT), а HFI содержит 48 болометрических детекторов, созданных в JPL-Калтехе, для регистрации фотонов. Приемные устрой-

ства охлаждались до 17 К специальной криогенной системой. Реализованные параметры LFI приемников приведены в табл. 1, а HFI приемников — в табл. 2 по данным 2015 г. [5].

Основные преимущества обсерватории “Planck” перед космической миссией WMAP были реализованы по нескольким параметрам:

- в три раза более высокое разрешение, что позволило измерить мощность сигнала на меньших угловых масштабах (до $5'$);
- в 10 раз более высокая чувствительность по T_b ;
- девять частотных полос, которые позволяют на усовершенствованной модели мешающих фоновых компонентов нашей Галактики лучше выделить сигнал реликтового фона.

Стоит отдельно отметить эксперимент на телескопе VICEP2/Keck. VICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) — специализированный эксперимент с низким угловым разрешением (апертура телескопа — 26 см, разрешение 0.52°), который проводился на Южном полюсе с 2010 по 2012 г. на частоте 150 ГГц с чувствительностью, сравнимой с “Planck”, на высокой галактической широте. В фокальной плоскости применялся болометр TES (transition edge sensor — датчик на краю перехода), содержащий 512 датчиков. По данным наблюдений коллаборация VICEP2 опубликовала результаты исследования [39, 40], в которых сделана оценка уровня В-моды поляризации со значительным превышением величины $r = 0$ в Λ CDM-модели с учетом линзирования в диапазоне мультиполей $30 < \ell < 150$. Несмотря на то, что эффект линзирования, вызванный ис-

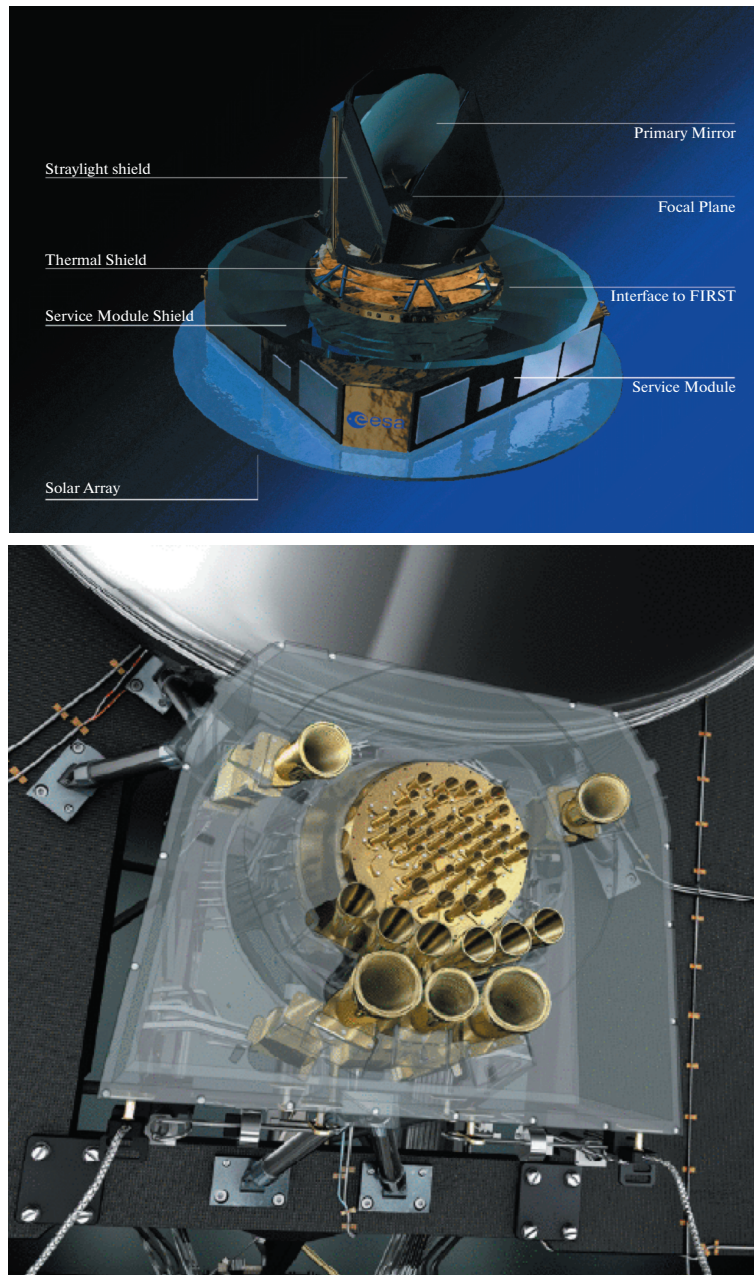


Рис. 4. Вверху — зонд “Planck”. Внизу — положение рупоров радиометров (на 30, 44, 70 ГГц) и болометров (100, 144, 217, 343, 545 и 847 ГГц) в фокальной плоскости спутника. Рисунок воспроизведен с сайта миссии “Planck” (<http://www.rssd.esa.int/“Planck”/>).

кривлением пространства скоплениями галактик и также вносящий искажения в В-моду поляризации, существенен на более мелких масштабах, его вклад учитывался при разделении компонентов. Вклад пыли был оценен по результатам предыдущего эксперимента ВИСЕР1 и карт WMAP и признан малосущественным на высоких галактических широтах. В результате анализа данных был открыт избыток поляризованного излучения в В-моду на градусных и субградусных масштабах.

Это, в принципе, могло говорить о существовании нового эффекта, наблюдаемого в В-моду на 150 ГГц. Авторы предположили, что сигнал имеет космологическое происхождение, а именно, в результате влияния искомым первичных гравитационных волн. Обнаруженный сигнал предполагает больший вклад в анизотропию СМВ, чем следовало из данных WMAP и опубликованных данных “Planck” по анизотропии температуры реликтового фона. Открытие означало усложнение теоретических моделей. С другой стороны,

Таблица 1. Реализованные при картографировании параметры LFI приемников “Planck”

Характеристика	частотная полоса, ГГц		
	30	44	70
Центральная частота, ГГц	28.4	44.10	70.4
Эффективный размер луча ДН, '	32.29	27.00	13.21
Эффективная эллиптичность ДН	1.32	1.04	1.22
Температурный шум (после сглаживания), мкК _{СМВ}	2.5	2.7	3.5
Поляризационный шум (после сглаживания), мкК _{СМВ}	3.5	4.0	5.0
Общая ошибка калибровки, %	0.35	0.26	0.20
Систематическая ошибка п-ра Стокса I , мкК _{СМВ}	0.19	0.39	0.40
Систематическая ошибка п-ра Стокса Q , мкК _{СМВ}	0.20	0.23	0.45
Систематическая ошибка п-ра Стокса U , мкК _{СМВ}	0.40	0.45	0.44

Таблица 2. Реализованные при картографировании неба параметры HFI приемников “Planck”

Характеристика	частотная полоса, ГГц					
	100	143	217	353	545	857
Число болометров	8	11	12	12	3	4
Эффективный размер луча, '	9.68	7.30	5.02	4.94	4.83	4.64
Эффективная эллиптичность ДН	1.186	1.04	1.169	1.166	1.137	1.336
Шум на телесный угол ДН, мкК _{СМВ}	7.5	4.3	8.7	29.7		
Шум на телесный угол ДН, кЯн · ср ⁻¹					9.1	8.8
Температурный шум, мкК _{СМВ} · град	1.29	0.55	0.78	2.56		
Температурный шум, кЯн ср ⁻¹ · град					0.78	0.72
Поляризационный шум, мкК _{СМВ} · град	1.96	1.17	1.75	7.31		
Точность калибровки, %	0.09	0.07	0.16	0.078	1.1 ± 5%	1.4 ± 5%

можно было предположить, что в обнаруженном сигнале имеется и другой компонент излучения, не учитываемый в эксперименте на одной наблюдательной частоте, как это было с ВІСЕР2. В апреле 2014 г. появилась работа сотрудников института Нильса Бора Лиу и др. [41], где обсуждалось возможное влияние намагниченной пыли на сигнал в В-моду поляризации на высоких галактических широтах. Излучение этой холодной пыли, представляющей собой облака из микроскопических вытянутых пылинок с вкраплением металлов, дает дополнительный вклад в поляризованный фон.

Такие облака находятся в остатках сверхновых со сравнительно сильными магнитными полями, что приводит к генерации поляризованного излучения. Угловые масштабы на небе, в которых может быть зарегистрировано подобное излучение, очень велики: например, Северный полярный шпур, образованный остатками сверхновых, наблюдается как аномальная полоса на карте синхротронного излучения, протянувшаяся от северного галактического полюса до средних широт южного галактического полушария. Интегральное излучение

на таких масштабах как раз дает вклад на градусных и больших масштабах. Как было отмечено в работе [41], наблюдения на Южном полюсе в Антарктиде в эксперименте ВІСЕР2 как раз могут зацепить области неба, где находится такая заряженная пыль. Позднее появились работы [42, 43], где также прорабатывалась идея о том, что избыток излучения в В-моду на градусных масштабах связан с заряженной пылью.

Работа коллектива “Planck” [44] по обсуждаемой теме появилась во второй половине сентября 2014 г. В отличие от ВІСЕР2, “Planck” измерял линейную поляризацию на четырех болометрических комплексах на частотах 100, 143, 217 и 353 ГГц. Это позволило учесть вклад различных компонентов излучения с разными спектральными индексами и уровень их яркости на разных угловых масштабах. В работе коллектива “Planck” был оценен вклад с различных участков неба с разным способом экранирования мешающих зон нашей Галактики. Были построены модели излучения (спектры мощности), уточняющие вклад компонентов галактического излучения на различных угловых масштабах. Отдельный раздел

работы посвящен излучению в В-моду поляризации в области наблюдений обсерватории ВИСЕР2. В частности, была проведена экстраполяция спектров мощности в В-моду поляризации, построенных по данным “Planck” на 353 ГГц на круговых участках карт СМВ площадью 400 кв. градусов на высоких галактических широтах, на частоту 150 ГГц (как у ВИСЕР2). Наибольшая частота была выбрана, так как изучать поляризацию пыли проще на более высокой частоте, где пылевой компонент ярче и исследуемый эффект сильнее. Имея набор перекрывающихся спектр частот, можно без особых проблем проводить интерполяцию на промежуточные частоты. Подробное исследование всех вкладов излучения на разных галактических широтах, а также на различных угловых масштабах позволило сделать, в частности, следующие выводы:

- экстраполяция спектров мощности показывает, что в областях на высоких галактических широтах существует значительное “загрязнение” пылью на угловых масштабах, наиболее интересных для исследования первичных гравитационных волн;

- поляризованное излучение пыли имеет спектр мощности со значительной дисперсией амплитуды; и, используя лишь данные “Planck”, невозможно выбрать на поляризационных картах области, абсолютно чистые от вклада пыли;

- при изучении площадки ВИСЕР2 на градусных и субградусных масштабах (гармоники $40 < \ell < 120$) экстраполяция спектра на частоту 150 ГГц дает величину 1.32×10^{-2} мкК $_{\text{СМВ}}^2$ со статистической погрешностью $\pm 0.29 \times 10^{-2}$ мкК $_{\text{СМВ}}^2$; эта величина сравнима с измерениями ВИСЕР2 в заданном диапазоне угловых масштабов;

- зависимость от частоты спектров мощности в В-моду поляризации соответствует ожидаемой в случае поляризованного излучения пыли;

- обнаружены области на небе, где вклад поляризованной пыли меньше в два раза по сравнению с зарегистрированным вкладом на площадке ВИСЕР2.

Вслед за работой [44] вышла статья с результатами совместного анализа данных “Planck” и ВИСЕР2 [45], где была установлена верхняя граница, обсуждаемая нами ранее: $r < 0.12$ с уровнем доверия 95%.

Проект антарктических исследований развивался в 2015–2018 гг.: ВИСЕР3 – это основанный на той же платформе одиночный отражательный телескоп с большей, чем у ВИСЕР2 и решеткой Кека апертурой (550 мм против 264 мм). Число детекторов выросло до 2560 для полосы 95 ГГц. А решетка Кека стала работать на четырех приемниках на частоте 220 ГГц, чтобы улучшить чувствительность к излучению пыли.

2.2. Определение космологических параметров

Стандартный программный конвейер (pipeline) анализа данных РИ может быть условно разделен на несколько этапов:

- 1) регистрация данных в виде временных рядов (Time Ordered Data – TOD) как зависимости измеряемой температуры от времени наблюдения или небесных координат: $T(t) = T(l, b)$, где (l, b) – галактическая долгота и широта;

- 2) первичная обработка полученных данных (в частности, удаление диполя и помех);

- 3) построение карты, включающее восстановление сигнала на сфере из TOD и осреднение данных в пикселях (процедура пикселизации) [46–48];

- 4) разделение компонентов микроволнового фона: выделение реликтового излучения, компонентов галактического фона, а также внегалактических источников;

- 5) разложение карты на сферические гармоники (мультиполи) и восстановление карты из сферических гармоник;

- 6) анализ статистики сигнала на карте;

- 7) анализ спектра мощности и определение космологических параметров.

Как правило, каждый этап включает в себя и тысячи моделирований эксперимента для выполняемых процедур.

Спектр мощности реликтового излучения определяется взвешенной суммой квадратов амплитуд гармоник:

$$C_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2. \quad (1)$$

Отметим, что в выражении (1) предполагается гауссово распределение $2\ell + 1$ коэффициентов $a_{\ell m}$, квадраты амплитуд которых усредняются с одинаковыми весами. В этом случае для двухточечного коррелятора справедливо (усреднение идет по ансамблю Вселенных)

$$\langle a_{\ell m} a_{\ell' m'}^* \rangle = C_\ell \delta_{\ell\ell'} \delta_{mm'}. \quad (2)$$

Необходимо также сказать, что мы наблюдаем C_ℓ на *нашем* небе. Если поместить наблюдателя в другую точку нашей Вселенной, C_ℓ будет слегка отличаться. Настоящий спектр C_ℓ можно оценить, осреднив данные всех наблюдателей, что в гауссовой Вселенной аналогично осреднению по ансамблю допустимых Вселенных (см. уравнение (2)). Если бы в наших наблюдательных данных по СМВ на полном небе отсутствовал шум, уравнение (2) давало бы точные $a_{\ell m}$, из которых, согласно (1), можно было бы получить несмещенную оценку истинного спектра C_ℓ , соответствующую осреднению по ансамблю. Однако у нас нет идеальных данных. И даже если бы они были, то для

низких мультиполей ℓ мы можем измерить только $2\ell + 1$ мод, что приводит к внутренним невязкам (разбросу значений) при определении спектра, называемым космической (лучше сказать, космологической) вариацией или космологической неопределенностью (cosmic variance):

$$\frac{\sigma_\ell}{C_\ell} = \sqrt{\frac{2}{2\ell + 1}}. \quad (3)$$

При определении космологических параметров по данным “Planck” в настоящее время используются три корреляционных спектра: угловой спектр мощности анизотропии (т.е. вариаций) температуры реликтового излучения, угловой спектр мощности поляризации РИ в электрической моде (Е-моде), корреляционный спектр между анизотропией температуры и Е-модой поляризации. Каждый спектр содержит по 2500 независимо измеренных точек. За спектрами стоят порядка 4 млрд. пикселей, полученных по данным десятков тысяч измерений в каждом пикселе на девяти частотах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 847 ГГц, и в двух модах поляризации для первых семи частот. Данные полностью покрывают небесную сферу и однородны. Таким образом, удастся легко и точно провести разделение фоновых компонентов нашей Галактики и данных реликтового микроволнового фона и построить соответствующие угловые спектры мощности. Особая “волнистая” форма спектра мощности, определяемая сахаровскими осцилляциями [27] в первичной плазме, позволяет с предельно высокой степенью точности найти и измерить амплитуды в точках максимума и минимума спектра. Это в свою очередь позволяет получить высокую точность измерения космологических параметров. Следует также отметить, что разделение компонентов проводится различными методами, и в результате получаются очень похожие карты РИ и, соответственно, практически совпадающий спектр C_ℓ , рассчитываемый при различных подходах.

Для расчетов в вероятностном параметрическом пространстве параметров, где для различных экспериментов проверяется космологическая модель, описываемая известными зависимостями (например, угловым спектром мощности СМВ, корреляционной функцией скоплений, зависимостью “абсолютная зв. величина – красное смещение” для СН Ia и/или другими параметрическими построениями), в настоящее время применяется стандартная процедура оценки параметров COSMOMC³ (COSMOlogical Monte Carlo) [49]. Процедура использует метод Монте-Карло для марковских цепей. Для генерирования выборок случайных вариаций параметров при апостериорном распределении с помощью марковской

цепи применяется алгоритм Метрополиса–Хастингса (Metropolis–Hastings), который позволяет выбирать положение в параметрическом пространстве на основе предыдущего положения (см. детальное описание в [49]). Программа использует входные оценки центральных величин и апостериорные значения отклонений различных параметров. Предлагаемая процедурой плотность разброса может учитывать информацию о корреляциях параметров из рассчитываемой ковариационной матрицы, если она значительно улучшит работу. Кроме того, для малого числа проверяемых космологических параметров можно строить сетку моделей и быстро интерполировать значения для промежуточных шагов. Однако при росте числа оцениваемых параметров стоимость вычислений на сетке растет экспоненциально.

Физическая параметризация процессов, включающая космологические параметры, которые влияют на формирование возмущений плотности и отражаются в флуктуации СМВ, предложена в [50], и в современном виде описана в работе коллаборации “Planck” [51] (см. также [52]). Для определения параметров использовались несколько программных пакетов, ссылки на которые можно найти в тех же работах. Из основных моментов в процедуре подгонки [51] отметим следующие:

- генерирование анизотропии СМВ в виде малых флуктуаций в метрике Фридмана–Леметра–Робертсона–Уолкера и их эволюцию в рамках ОТО;
- рассмотрение CDM как материи, не имеющей давления, стабильной и электромагнитно не взаимодействующей;
- основной компонентный состав барионов: Н и He; процесс стандартного нуклеосинтеза в эпоху Большого взрыва (BBN – Big Bang Nucleosynthesis) может быть точно промоделирован, и в результате могут быть получены предсказанные значения Y_p , отношение числа фотонов к барионам и скорость расширения, которая зависит от числа релятивистских степеней свободы;
- термодинамическое равновесие в первичной плазме до отделения нейтрино после аннигиляции электронов и позитронов. При расчетах предполагается термодинамическое равновесие до закалки нейтрино [51], которая почти, но не полностью, завершается ко времени электронно-позитронной аннигиляции. Это приводит к легкому нагреву нейтрино в добавление к тому, что ожидается для фотонов, и, следовательно, к небольшому нарушению предсказания о термодинамическом равновесии $T_\gamma = (11/4)^{1/3} T_\nu$ между температурой фотонов T_γ и температурой нейтрино T_ν . При учете дополнительной плотности энергии нейтрино

³ <http://cosmologist.info/cosmomc/>

предполагается, что они имеют тепловое распределение с эффективной плотностью энергии

$$\rho_v = N_{\text{eff}} \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} \rho_\gamma, \quad (4)$$

где эффективное число типов нейтрино $N_{\text{eff}} = 3.046$ в базовой модели. Плотность энергии одинаково делится между тремя типами нейтрино, которые являются релятивистскими;

- учет продолжительности процесса ионизации H и He;
- генерирование адиабатических скалярных возмущений начиная с самых ранних времен со спектром мощности

$$\mathfrak{S}_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1 + 0.5(dn_s/d \ln k) \ln(k/k_0)}, \quad (5)$$

где A_s — амплитуда первичных возмущений, k_0 — волновое число, характеризующее масштабную привязку ($k_0 = 0.05 \text{ Мпк}^{-1}$), приблизительно равную середине логарифмического диапазона масштабов, на которых проводил измерения “Planck”, n_s — спектральный индекс (индекс наклона спектра первичных возмущений плотности), $dn_s/d \ln k$ — убегание спектрального индекса (running of spectral index), показывающий темп изменения наклона спектра;

- генерирование гравитационных волн (тензорная мода) со значимой амплитудой:

$$\mathfrak{S}_t(k) = A_t \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_t}, \quad (6)$$

при этом вводится соответствующий параметр $r_{0.05} \equiv A_t/A_s$ — отношение первичных мод, тензорной к скалярной, при $k = k_0$, и рассматривается также построение для $r_{0.002}$ при $k = 0.002 \text{ Мпк}^{-1}$, близком к масштабам, которые чувствительны к тензорной моде в угловом спектре мощности температуры на низких гармониках;

- добавление динамической темной энергии.

Накопление данных по РИ, подключение данных по ВВН, барионным осцилляциям и сверхновым, позволило зафиксировать космологические параметры стандартной модели ΛCDM . Приведем минимальный набор космологических параметров действующей согласованной модели на 2018 г. [6]. Он включает:

1) угловой размер акустического горизонта эпохи последнего рассеяния, измеряемый по положению пиков в угловом спектре мощности $\theta_* = 0.5965 \pm 0.0002 \text{ рад}$;

2) амплитуда первичных возмущений $\ln(10^{10} A_s) = 3.047 \pm 0.014$;

3) скалярный спектральный индекс (показывающий относительную скорость роста первичных возмущений плотности на разных масштабах, из которых потом образовались галактики и скопления галактик) $n_s = 0.9665 \pm 0.0038$;

4) плотность барионной материи $\Omega_b h^2 = 0.02242 \pm 0.00014$, где h — постоянная Хаббла $H_0/100$ (откуда $\Omega_b \approx 0.049$);

5) плотность темной материи $\Omega_{\text{CDM}} h^2 = 0.11933 \pm 0.00091$ ($\Omega_{\text{CDM}} \approx 0.259$), а сумма плотностей видимой и темной материи — $\Omega_m = 0.3111 \pm 0.0056$;

6) оптическая толщина на эпоху реионизации $\tau = 0.0561 \pm 0.0071$, чему соответствует красное смещение $z_{re} = 7.82 \pm 0.71$ (возраст Вселенной ~ 650 млн. лет), на котором произошла вторичная ионизация Вселенной первыми звездами и квазарами.

Измеренные параметры позволяют зафиксировать космологическую модель и определить остальные производные и дополнительные параметры как с использованием только данных “Planck”, так и с применением данных других экспериментов в согласованных оценках. Среди остальных параметров отметим плотность темной энергии $\Omega_\Lambda = 0.6889 \pm 0.0056$, величина которой связана и с размером θ_* , и с прохождением фотонов РИ сквозь формирующиеся скопления галактик за космологическое время (эффект Сакса–Вольфа). Другим важным параметром является параметр расширения Хаббла в настоящую эпоху — постоянная Хаббла $H_0 = 67.66 \pm 0.42 \text{ км/с/Мпк}$. Отметим, что угловой спектр мощности РИ очень чувствителен к вариациям этого параметра (рис. 5).

С параметром Хаббла связан и возраст Вселенной $t_0 = 13.787 \pm 0.020$ млрд. лет. Знание оптической толщины, которая определяет свойства среды и связана с плотностью материи, а также применение данных о гравитационном линзировании фиксируют неравномерность распределения вещества. Эта величина описывается параметром $\sigma_8 = 0.8102 \pm 0.0060$, характеризующим сгущивание материи в кубе со стороной 8 Мпк. Еще один параметр плотности, $\Omega_K = 1 - \Omega_0$, описывающий кривизну Вселенной, связан с суммарной плотностью всех компонентов энергии Ω_0 , объединяющей Ω_Λ , Ω_{CDM} , Ω_b , плотности излучения и нейтрино, и с размером характерных пятен РИ на момент рекомбинации θ_* . Используя только данные РИ, куда входят и измерения “Planck” и учитываются линзирование и данные оптических обзоров, имеем оценку кривизны: $\Omega_K = 0.0007 \pm 0.0019$. Малое значение Ω_K является признаком того, что наша Вселенная с высокой точностью плоская (т.е. сумма углов любого треугольника, построенного на больших масштабах порядка десятков

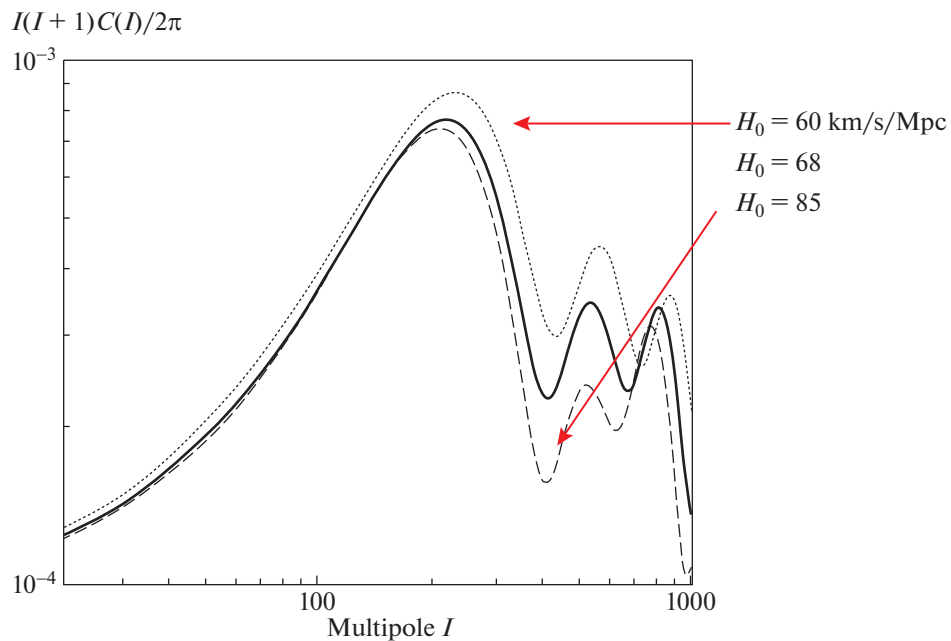


Рис. 5. Изменение формы углового спектра мощности реликтового излучения при изменении величины постоянной Хаббла H_0 .

миллионов световых лет, равна 180°). Кроме того, необходимо отметить, что Λ CDM — это все-таки семейство моделей, допускающее различные вариации основных параметров и включающее также различные расширения.

В той же работе “Planck” [6] обосновывается новый стандарт, объединяющий практически все космологические тесты в один, — стандартный угловой спектр мощности анизотропии РИ. Спектр сейчас содержит 2500 независимых измерений энергетических величин — квадратов амплитуд гармоник на различных угловых масштабах. Их значения строго привязаны к физическим процессам, протекавшим в разные эпохи Вселенной, и с помощью этой кривой спектра можно измерять различные космологические параметры.

3. ДРУГИЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕСТЫ

Реликтовое излучение является ключевым космологическим тестом и для фиксации горячего начала Вселенной, как было во время его открытия, так и тестом на соответствие описания эволюционирующей Вселенной Λ CDM, как происходит сейчас. Отметим связанные с реликтовым излучением следующие тесты:

- существование СМВ, что было подтверждено приблизительно в сотне наблюдательных экспериментов, проводящихся с 1964 г. [12];
- чернотельность реликтового излучения, что показано в измерениях обсерватории COBE на инструменте Far InfraRed Absolute Spectrophotometer (FIRAS) [53];

- существование флуктуаций температуры СМВ, обнаруженных в миссии COBE на инструменте Differential Microwave Radiometer (DMR) [13];
- измерение спектра мощности неоднородности реликтового излучения и положения максимумов и минимумов на этом спектре;
- проверка возрастания температуры РИ с красным смещением (т.е. пропорционально $(1+z)$);
- наличие Е-моды поляризации СМВ.

Кроме того, следует отметить, что в угловом спектре мощности разные интервалы мультиполей могут быть использованы как независимые данные для проверки модели. Статистические особенности карты РИ помогают определять топологические особенности Вселенной. А кросс-корреляционные спектры температуры и поляризации также участвуют в независимых измерениях космологических параметров. Следует также сказать, что при анализе данных “Planck” был применен новый космологический тест, связанный с гравитационным линзированием космического микроволнового фона и позволивший независимо измерить параметры плотности [54]. Важно также отметить, что поведение измеренного углового спектра мощности анизотропии РИ и, в частности, положения максимумов и минимумов на этом спектре удастся объяснить только в рамках космологической модели Λ CDM [6].

Реликтовое излучение хотя и основной, но все же не единственный космологический тест при определении эволюционных свойств Вселенной. Среди основных тестов отметим следующие:

- стандартные свечи, когда на космологических расстояниях используются сверхновые типа СН Ia [14, 15];
- стандартные линейки, когда используются размер радиоисточников [55, 56] и характерный масштаб барионных осцилляций в крупномасштабной структуре [16];
- стандартные часы, когда по возрасту самых старых галактик, определяемому по звездному населению, восстанавливается динамика Вселенной [57, 58];
- подсчеты объектов, применяемые для изучения как плотности Вселенной, так и их эволюционных свойств [59];
- абсорбционные линии в спектрах квазаров, помогающие исследовать распределение и эволюцию вещества крупномасштабной структуры Вселенной в различные космологические эпохи (см., напр., [60]);
- сгущение материи, определяемое по корреляционным функциям и используемое при измерении параметров барионных осцилляций и при сравнении с симуляциями (численными моделями) эволюции крупномасштабной структуры;
- гравитационное линзирование, применяемое для оценки скорости расширения Вселенной в разные эпохи и для определения параметров плотности;
- параметры скоплений галактик, измеряемые в разных диапазонах спектра от радио до рентгеновского, а также через гравитационное линзирование, которые можно использовать для изучения эволюционных свойств скоплений галактик и оценок параметров плотности Вселенной.
- наблюдательные данные по распространенности водорода и первичного гелия, по которым независимо определяются физические свойства ранней Вселенной в период первичного нуклеосинтеза (Big Bang Nucleosynthesis) [17].

Важно сказать, что новые космологические тесты появляются постоянно, например, связанные с гравитационными волнами [61].

Среди современных стандартных тестов, активно применяемых в работах по согласованному измерению космологических параметров, наряду с данными РИ используются данные по сверхновым СН Ia, барионным осцилляциям первичному и первичному нуклеосинтезу. Эти тесты лежат в основе согласованного определения космологических параметров. Как наиболее тяжеловесные данные по широте обзора, полноте и чувствительности после данных “Planck” используются данные обзора SDSS [21] по программе BOSS [16]. Результаты определения космологических параметров в согласованной модели Λ CDM приведены в предыдущем разделе 2.

4. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИИ

Несмотря на фундаментальные космологические измерения обзоров “Planck” и BOSS, модель Λ CDM постоянно подвергается проверкам стандартными и другими тестами. В последнее время современная космологическая модель критиковалась как минимум по трем направлениям в специализированных журналах: определение постоянной Хаббла [62], наличие кривизны пространства [63] и существование темной энергии [64].

Картина с микроволновыми данными “Planck” и барионными осцилляциями в SDSS в целом понятна. Но имеются еще и данные группы Адама Рисса [62], нобелевского лауреата, одного из открывателей факта ускоренного расширения Вселенной. Его результаты определения постоянной Хаббла (проект SH0ES — SN, H0, Equation of State of dark energy) отличаются более чем на 3.5 σ от величины H_0 коллаборации “Planck”: по Риссу и др. $H_0 = 73.52 \pm 1.62$ км/с/Мпк на 2018 г. Команда Рисса использует сверхновые типа СН Ia как стандартные свечи. Взрыв белого карлика в двойной звездной системе при перетекании на него вещества со звезды-компаньона и при запуске термоядерных реакций приводит к вспышке сверхновой стандартной светимости (из-за существования предельной массы белого карлика) и несложной для опознания затухающей кривой блеска СН Ia. Вспышка по яркости сравнима с родительской галактикой и при известном красном смещении позволяет построить диаграмму Хаббла, и с ее помощью определить параметры расширения Вселенной. Это можно сделать, если данных по объектам типа СН Ia достаточно много и они перекрывают большой диапазон красных смещений.

Если различие в данных “Planck” и группы Рисса реально, то придется говорить об изменении физических свойств Вселенной, причем, возможно, с привлечением новой физики. Если это эффект систематики, например, связанный с трудно учитываемым изменением эволюционных свойств объектов в разные эпохи, неполнотой данных, особенностями наблюдений или методикой обработки данных, то нужно выяснить, кто неправ: коллаборация “Planck” или команда Рисса. Особенность данных “Planck”, о которой уже не раз говорилось, — полнота и однородность данных обзора на сфере. Данные Рисса основаны на построении точной лестницы расстояний и измерениях кривых блеска сверхновых СН Ia. Лестница расстояний включает много различных стандартных по светимости объектов и методов измерений расстояний до них. В классическом варианте ее фундамент строится на измерении тригонометрических параллаксов цефеид Млечного Пути, позволяющих определить расстояния до объектов с помощью простых методов реше-

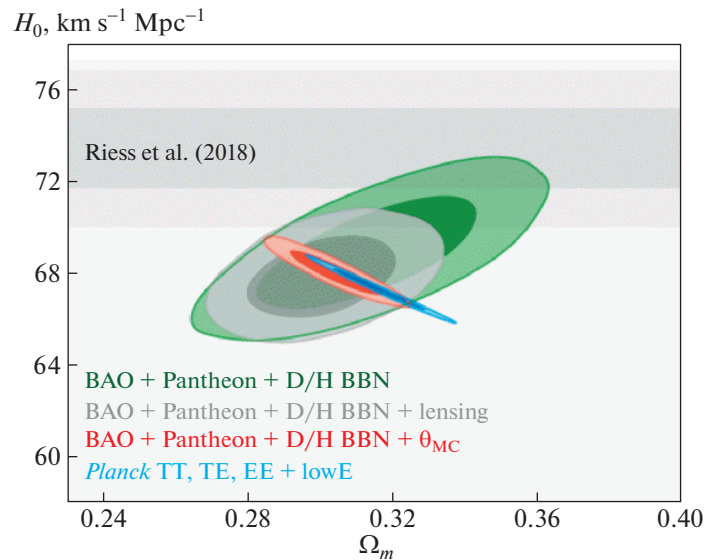


Рис. 6. Диаграмма “постоянная Хаббла H_0 – плотность вещества Ω_m ”, показывающая различие в определении величины постоянной Хаббла в согласованной модели Λ CDM и в данных группы Рисса [62]. Разными цветами выделены измерения параметров при комбинации данных различных экспериментов, оттенками цветов – доверительные интервалы на уровнях 68 и 95%. Обозначены: BAO – барионные акустические осцилляции, Pantheon – данные по проекту измерения блеска сверхновых SN Ia, D/H BBN – данные по измерению дейтерия при первичном нуклеосинтезе, lensing – данные по измерению линзирования CMB “Planck”, θ_{MC} – учет размера акустического горизонта. Серым цветом показаны результаты, полученные группой Рисса. Приведен рисунок из работы [6].

ния треугольника по известной стороне (радиусу орбиты Земли, например) и углом. Угол смещения звезды в проекции на небо за время путешествия наблюдателя по орбите вокруг Солнца позволяет практически прямым способом определить расстояние до нее, а с учетом опубликованных данных спутника Gaia ESA заявленная точность определения параллаксов достигла 30–40 угловых микросекунд для звезд на расстояниях 2–4 кпк с учетом их собственных движений. Цефеиды – класс переменных звезд, чей период вариации блеска связан с их светимостью, и таким образом их можно использовать как стандартные свечи, если известен период переменности. Если точно откалибровать расстояние до цефеид и далее от цефеид до SN Ia (для этого в близких галактиках, где произошла вспышка SN Ia, ищутся цефеиды), то удастся построить надежную последовательность расстояний и проводить космологические измерения. Несмотря на то, что приведенный метод считается классическим, в последнее время он подвергается проверкам и коррекции. Среди рассматриваемых проблем метода обсуждаются точность определения координат звезд методом тригонометрических параллаксов с использованием данных спутника Gaia [65], ненадежность цефеид [66] и сверхновых SN Ia как стандартных свечей, а также комбинации этих методов и возможное накопление ошибок при их применении.

На рис. 6 показаны уровни значимости функции правдоподобия определения параметров в разных

экспериментах, отображенные в диаграмме “постоянная Хаббла H_0 – плотность вещества Ω_m ”.

Говоря о сверхновых типа SN Ia, важно помнить, что список их небольшой – более-менее надежных объектов этого типа около 2000 [14, 15]. Результаты измерений кривых блеска SN Ia при красных смещениях $z > 1$ мало, при $z > 2$ их, в общем, и нет (заметим, что при $z = 2$ возраст Вселенной $t \sim 3.3$ млрд. лет). Кроме того, все еще нет уверенной информации, насколько стандартным является тип SN Ia. И если для поиска, обнаружения и измерения вклада темной энергии достаточно было порядка десятка сверхновых за $z > 0.7$ (условная граница $z \sim 0.7$, когда возраст Вселенной $t \sim 7$ млрд. лет, задает область временного интервала, в которой при движении из прошлого в настоящее происходит переход от пылевой эпохи Вселенной к эпохе темной энергии), то для точных измерений нескольких десятков объектов уже недостаточно. Неясно, насколько стандартными являются SN Ia при другом химическом составе, который был в более ранние эпохи. Не очень ясно, как себя ведет кривая блеска SN Ia при взрыве компонента в паре двух белых карликов [67] и сколько таких пар участвует в производстве вспышек. Списки сверхновых SN Ia неоднородны и неполны по пространственным направлениям и по космологическим эпохам, что ограничивает возможность обобщения результатов даже в случае точного измерения кривых блеска. Можно отметить, что обсуждаются сразу

оба случая как верные, т.е. надо принять и измерения H_0 по согласованным данным “Planck”, и оценки по данным группы Рисса. Например, изучается возможное изменение плотности темной материи со временем, например ее распад [68] или переходы в состоянии темной энергии [69]. Очевидно, в любом случае нужны новые наблюдения, но при учете значимости данных, согласованная оценка по данным “Planck” и BOSS выглядит, как имеющая меньшую потенциальную систематическую погрешность.

Другой интересный факт, связанный с СМВ и обсуждаемый, как относящийся к данным “Planck”, касается величины пространственной кривизны Вселенной [63]. Результаты, полученные при применении предложенной авторами методики, показывают, что Вселенная имеет положительную кривизну ($-0.007 > \Omega_K > -0.095$) на уровне достоверности 99%. Это значение получено при освобождении параметра Ω_K , который обычно связан с параметрами плотности и определяется только через них. При его независимом определении авторы использовали также эффект аномального линзирования СМВ. В качестве данных “Planck” при этом используется измеренный угловой спектр мощности. В целом подход исследования этого параметра интересен, хотя и не применяется в стандартных методах определения параметров. Здесь можно отметить еще один любопытный факт, указанный прямо в оригинальной работе [64] и демонстрирующий нестабильность работы предложенной методики: результаты определения параметров по разным наборам данных противоречат как точным измерениям обсерватории “Planck”, так и друг другу. Если процедура определения космологических параметров, включающая независимое определение Ω_K , по данным “Planck” дает оценку

значения постоянной Хаббла $H_0 = 54^{+3.3}_{-4.0}$ км/с/Мпк с достоверностью 68%, то для комбинированного набора данных (BAO + SN Ia + BBN) получается $H_0 = 79.6 \pm 6.8$ км/с/Мпк на уровне достоверности 68%. Эти оценки несовместимы на уровне 3.4 σ . Напомним, что согласованная современная оценка, полученная при стандартном определении: $H_0 = 67.66 \pm 0.42$ км/с/Мпк [6].

Другое направление современных исследований — изучение статистических свойств карты РИ, которые могут быть связаны с ранней Вселенной, а именно проверка гауссовости сигнала РИ, предсказываемого в простейших инфляционных моделях. Если будет обнаружена негауссовость, это может указывать как на нестандартную физику и сложную топологию в ранней Вселенной, так и на проблемы в методиках учета фоновых компонентов излучения и обработки данных (см., напр., обзор [70]). Используя наблюдательные данные и моделирование сигнала СМВ в раз-

ных топологических многосвязных пространственно-временных Вселенных, авторы работы [71–73] закрыли многосвязные модели Вселенной с плоской, гиперболической и сферической геометрией. Кроме того, было показано, что данные “Planck” не позволяют достоверно сказать о корреляциях, которые бы присутствовали в случае нетривиальных топологий, вроде Вселенной в виде додекаэдра или кубического тора.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на точное измерение космологических параметров, построение космологической картины Мира еще не завершено. Мы не знаем пока состав темной материи и тип субстанции, отвечающей за темную энергию. Неизвестна причина асимметрии вещества и антивещества. Неизвестны параметры инфлатонного поля, и вообще была ли такая эпоха. Кроме того, существенный для космологии параметр — масса нейтрино. И если первый набор параметров требует множества экспериментов в разных диапазонах энергий, то для последних двух — исследования эпохи инфляции и измерения массы нейтрино — уже готовятся эксперименты следующего поколения по изучению анизотропии температуры и поляризации реликтового излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [74]. Подготовка этих экспериментов по исследованию СМВ объединяет теоретиков и несколько коллективов наблюдателей телескопов микроволнового диапазона. Основные задачи обсуждаемых проектов связаны с очень ранней Вселенной и физикой элементарных частиц и объединяются в рамках программы СМВ Stage 4 (СМВ-S4) [74].

Первая и основная их цель — измерить уровень неоднородностей на картах поляризации в В-моду, существование которых предсказывается в теории инфляции и связано с первичными гравитационными волнами [75–79]. Уровень неоднородностей в В-моду описывается параметром r , характеризующим отношение вклада в анизотропию в тензорной моде к вкладу в скалярной. Наблюдаемое распределение первичных возмущений в простейших моделях позволяет сделать прогноз этой величины на уровне $r > 0.001$, и в ряде моделей даже $r > 0.003$. Предполагается, что эксперименты поколения СМВ-S4 должны позволить измерить амплитуду первичных гравитационных волн на уровне 5σ при $r > 0.003$ и продвинуться в проблеме квантовой гравитации выбора корректной инфляционной модели.

Вторая цель — проследить тепловую историю Вселенной в раннюю эпоху, предсказываемую Стандартной моделью в физике элементарных частиц. Ранняя Вселенная — эпоха очень высоких энергий, критичная к свойствам частиц и воз-

можным проявлениям отклонений от Стандартной модели, которые можно проверять с помощью уровня генерируемой анизотропии. В частности, можно будет проверить количество типов релятивистских частиц, в то нейтрино N_{eff} , уменьшить оценку верхнего предела суммы их масс до 0.06 эВ и возможно определить массу гипотетического стерильного нейтрино.

Кроме того, новый качественный уровень предполагает построение карт неба в микроволновом диапазоне в широком диапазоне частот от 20 до 270 ГГц с беспрецедентной чувствительностью (< 1 мК) и высоким угловым разрешением $\leq 1.5'$. Эти данные будут востребованы при исследовании эволюции крупномасштабной структуры, взаимодействия СМВ и вещества в скоплениях галактик, построения спектра мощности линзирующего потенциала, оценок параметров темной энергии в разные космологические эпохи, а также помогут в численном моделировании эволюции скоплений материи.

Для проведения экспериментов СМВ-S4 предполагается объединить несколько телескопов, которые могут быть расположены в Чили и на Южном полюсе. Проект включает 18 телескопов с малой апертурой (0.5 м) – SAT, и три телескопа с большой апертурой (6 м) – LAT.

Сейчас продолжают измерения анизотропии температуры и поляризации на нескольких телескопах на Южном полюсе (телескопы VICEP3/Keck array и SPT) [80, 81] и в Чили (ACT и APEX) [82, 83]. Возможно, что в ближайшее время появятся новые результаты по измерению В-моды поляризации, которые в любом случае потребуют независимой проверки в экспериментах следующего поколения, таких как СМВ-S4 [74] или неподдержанный космический проект CORE [84]. Окончательное построение стандартной космологической модели не завершено. И для ее развития будущие критические эксперименты исследования РИ сыграют важную роль.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Подготовка этого обзора была поддержана грантом РФФИ “Экспансия” № 19-12-50012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 1 (2003), arXiv:astro-ph/0302207.
2. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, N. Odegard, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 225 (2009), arXiv:0803.0732 [astro-ph].
3. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, B. Gold, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, id. 14 (2011), arXiv:1001.4744 [astro-ph.CO].
4. G. Hinshaw, D. Larson, E. Komatsu, D. N. Spergel, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **208**, id. 19 (2013).
5. R. Adam, P. A. R. Ade, N. Aghanim, Y. Akrami, et al., *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A1 (2016), arXiv:1502.01582 [astro-ph.CO].
6. N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, et al., *Astron. and Astrophys.* **641**, id. A6 (2020), arXiv:1807.06209 [astro-ph.CO].
7. R. Alpher and R. Herman, *Phys. Rev.* **74**, 1737 (1948).
8. G. Gamow, *Matematisk-fysiske meddelelser* (Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, 1917).
9. А. Г. Дорошкевич, И. Д. Новиков, Доклады АН СССР **154**, 809 (1964).
10. A. A. Penzias and R. W. Wilson, *Astrophys. J.* **142**, 419 (1965).
11. R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll, and D. T. Wilkinson, *Astrophys. J.* **142**, 414 (1965).
12. П. Д. Насельский, Д. И. Новиков, И. Д. Новиков, *Реликтовое излучение* (М.: Наука, 2003).
13. G. F. Smoot, C. L. Bennett, A. Kogut, E. L. Wright, et al., *Astrophys. J. Letters* **396**, L1 (1992).
14. S. Perlmutter and B. P. Schmidt, *Lecture Notes in Physics*, **598**, 195 (2004).
15. A. Riess, L.-G. Strolger, J. Tonry, S. Casertano, et al., *Astrophys. J.* **607**, 665 (2004).
16. A. Bruce and R. Hlozek, in *Dark Energy*, edited by P. Ruiz-Lapuente (Cambridge University Press, 2010), arXiv:0910.5224 [astro-ph.CO].
17. G. Steigman, *Ann. Rev. Nuclear and Particle Science* **57**, 463 (2007), arXiv:0712.1100 [astro-ph].
18. M. Boylean-Kolchin, V. Springel, S. D. M. White, A. Jenkins, and G. Lemson, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **398**, 1150 (2009), arXiv:0903.3041 [astro-ph.CO].
19. D. Nelson, A. Pillepich, S. Genel, M. Vogelsberger, et al., *Astron. and Comput.* **13**, 12 (2015), arXiv:1504.00362 [astro-ph.CO].
20. J. Schaye, A. R. Crain, R. G. Bower, M. Furlong, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **446**, 521 (2015), arXiv:1407.7040 [astro-ph.GA].
21. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, S. S. Allam, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009), arXiv:0812.0649 [astro-ph].
22. Ch. P. Ahn, R. Alexandroff, C. A. Prieto, S. F. Anderson, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **203**, 21 (2012), arXiv:1207.7137 [astro-ph.IM].
23. V. Mukhanov, *Physical Foundations of Cosmology* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005).
24. B. Ryden, *Introduction to Cosmology*, 2nd ed. (New York: Cambridge University Press, 2017).
25. Д. С. Горбунов, В. А. Рубаков, *Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория* (М.: КРАСАНД, 2010).
26. В. Н. Лукаш, Е. В. Михеева, *Физическая космология* (М.: ФизМатЛит, 2010).
27. А. Д. Сахаров, *ЖЭТФ* **49**(1), 345 (1966).
28. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, *Astrophys. J.* **147**, 73 (1967).
29. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, *Astrophys. Space Sci.* **4**, 301 (1969).
30. А. С. Компанеев, *ЖЭТФ* **31**(5) 876 (1957).

31. *R. A. Sunyaev and Ya. B. Zel'dovich*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **190**, 413 (1980).
32. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.*, Astron. and Astrophys. **594**, id. A13, (2016), arXiv:1502.01589 [astro-ph.CO].
33. *J. M. Kovac, E. M. Leitch, C. Pryke, J. E. Carlstrom, N. W. Halverson, and W. L. Holzapfel*, Nature **420**, 772 (2002).
34. *A. C. S. Readhead, S. T. Myers, T. J. Pearson, J. L. Sievers, et al.*, Science **306**, 836 (2004).
35. *P. de Bernardis, P. A. R. Ade, J. J. Bock, J. R. Bond, et al.*, Astrophys. J. **564**, 559 (2002).
36. *T. A. Semanova, Yu. N. Pariiskii, and N. N. Bursov*, Astron. Rep. **53**, 1 (2009).
37. *Ю. Н. Парийский, О. В. Верходанов*, Астрон. журн. **94**, 323 (2017).
38. *E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley, C. L. Bennett, et al.*, Astrophys. J. Suppl. **192**, id. 18 (2011).
39. *P. A. R. Ade, R. W. Aikin, M. Amiri, D. Barkats, et al.*, Astrophys. J. **792**, id. 62 (2014), arXiv:1403.4302 [astro-ph.CO].
40. *P. A. R. Ade, R. W. Aikin, D. Barkats, S. J. Benton, et al.*, Phys. Rev. Lett. **112** id. 241101 (2014), arXiv:1403.3985 [astro-ph.CO].
41. *H. Liu, P. Mertsch, and S. Sarkar*, Astrophys. J. Letters **789**, L29 (2014), arXiv:1404.1899 [astro-ph.CO].
42. *M. J. Mortonson and U. Seljak*, J. Cosmology and Astroparticle Phys. № 10, id. 035 (2014), arXiv:1405.5857 [astro-ph.CO].
43. *R. Flauger, J. C. Hill, and D. N. Spergel*, J. Cosmology and Astroparticle Phys. № 08, id. 039 (2014), arXiv:1405.7351 [astro-ph.CO].
44. *R. Adam, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.*, Astron. and Astrophys. **586**, id. A133 (2016), arXiv:1409.5738 [astro-ph.CO].
45. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, Z. Ahmed, R. W. Aikin, et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, id. 101301 (2015), arXiv:1502.00612 [astro-ph.CO].
46. *K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, et al.*, Astrophys. J. **622**, 759 (2005).
47. *A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, J. Kim, et al.*, Intern. J. Modern Physics D **20**, 1053(2011), arXiv:0904.2517 [astro-ph.CO].
48. *О. В. Верходанов, А. Г. Дорошкевич*, Успехи физ. наук **183**, 849 (2013).
49. *A. Lewis and S. Bridle*, Phys. Rev. D **66**, id. 103511 (2002), arXiv:astro-ph/0205436.
50. *P. J. E. Peebles and J. T. Yu*, Astrophys. J. **162**, 815 (1970).
51. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, et al.*, Astron. and Astrophys. **571**, id. A16 (2014).
52. *О. В. Верходанов*, Успехи физ. наук **186**, 3 (2016).
53. *J. C. Mather, E. S. Cheng, and R. E. J. Eplee*, Astrophys. J. **354**, L37 (1990).
54. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, et al.*, Astron. and Astrophys. **571**, id. A17 (2014).
55. *L. I. Gurvits, K. I. Kellermann, and S. Frey*, Astron. and Astrophys. **342**, 378 (1999).
56. *O. V. Verkhodanov and Yu. N. Pariiskij*, Bull. SAO **55**, 66 (2003).
57. *R. Jimenez and A. Loeb*, Astrophys. J. **573**, 37 (2002), arXiv:astro-ph/0106145.
58. *O. V. Verkhodanov, Yu. N. Pariiskij, and A. A. Starobinsky*, Bull. SAO **58**, 5 (2005), arXiv:0705.2776 [astro-ph].
59. *J. J. Condon*, Astrophys. J. **284**, 44 (1984).
60. *M. Demianski and A. Doroshkevich*, Astrophys. J. **597**, 81 (2003).
61. *C. Caprini and D. G. Figueroa*, Classical and Quantum Gravity **35**(16), id. 163001 (2018), arXiv:1801.04268 [astro-ph.CO].
62. *A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. Macri, et al.*, Astrophys. J. **861**, id. 126 (2018), arXiv:1804.10655 [astro-ph.CO].
63. *E. Di Valentino, A. Melchiorri, and J. Silk*, Nature Astron. **4**, 196 (2019), arXiv:1911.02087 [astro-ph.CO].
64. *Y. Kang, Y.-W. Lee, Y.-L. Kim, C. Chung, and C. H. Ree*, in press (2020), arXiv:1912.04903 [astro-ph.GA].
65. *T. Shanks, L. M. Hogarth, and N. Metcalfe*, arXiv:1810.02595 [astro-ph.CO] (2018).
66. *W. Lin, K. J. Mack, and L. Hou*, arXiv:1910.02978 [astro-ph.CO] (2019).
67. *L. R. Yungelson and A. G. Kuranov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **464**, 1607 (2017), arXiv:1610.07230 [astro-ph.SR].
68. *A. Chudaykin, G. Gorbunov, and I. Tkachev*, Phys. Rev. D **97**, id. 083508 (2018).
69. *G. Benevento, W. Hu, and M. Raveri*, Phys. Rev. D **101**, id. 103517 (2020), arXiv:2002.11707 [astro-ph.CO].
70. *О. В. Верходанов*, Успехи физ. наук **182**, 1177 (2012).
71. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, et al.*, Astron. and Astrophys. **571**, id. A25 (2014).
72. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, et al.*, Astron. and Astrophys. **571**, id. A26 (2014).
73. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, Y. Akrami, P. K. Aluri, et al.*, Astron. and Astrophys. **594**, id. A16 (2016), arXiv:1506.07135 [astro-ph.CO].
74. *K. Abazajian, G. Addison, P. Adshead, Z. Ahmed, et al.*, arXiv:1907.04473 [astro-ph.IM] (2019).
75. *L. P. Grishchuk*, Sov. J. Experim. Theoret. Phys. **40**, 409 (1975).
76. *A. A. Starobinskij*, JETP Letters **30**, 682 (1979).
77. *V. A. Rubakov, M. V. Sazhin, and A. V. Veryaskin*, Phys. Letters B **115**, 189 (1982).
78. *K. Sato*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **195**, 467 (1981).
79. *A. G. Polnarev*, Soviet Astron. **29**, 607 (1985).
80. *Z. Ahmed, M. Amiri, S. J. Benton, J. J. Bock, et al.*, Proc. SPIE **9153**, id. 91531N (2014), arXiv:1407.5928 [astro-ph.IM].
81. *J. W. Henning, J. T. Sayre, C. L. Reichardt, P. A. R. Ade, et al.*, Astrophys. J. **852**, id. 97 (2018).
82. *J. L. Sievers, R. A. Hlozek, M. R.olta, V. Acquaviva, et al.*, J. Cosmology and Astroparticle Phys. № 10, id. 060 (2013), arXiv:1301.0824 [astro-ph.CO].
83. *A. Nagarajan, F. Pacaud, M. Sommer, M. Klein, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **488**, 1728 (2019), arXiv:1804.03671 [astro-ph.CO].
84. *E. Di Valentino, T. Brinckmann, M. Gerbino, V. Poulin, et al.*, J. Cosmology and Astroparticle Phys. № 4, id. 017 (2018), arXiv:1612.00021 [astro-ph.CO].