

УДК 524.827-17

СРАВНЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАРТ СМВ КОСМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ WMAP И PLANCK

© 2016 О. В. Верходанов*, Я. В. Найден

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 11 июля 2016 года; принята в печать 24 августа 2016 года

Сравниваются анизотропные свойства карт космического микроволнового фона (СМВ), построенные в результате проведения экспериментов NASA WMAP девятого года наблюдений и ESA Planck (релиз 2015 г). Для анализа применяются два двумерных эстиматора величины разброса значений сигнала на сфере, являющихся алгоритмами картографирования отношения величин разброса на северной и южной полусферах в зависимости от способа разбиения (а именно, поворота и разрезания) неба на полусферы. Разброс вычисляется либо как стандартное отклонение σ , либо как разность максимального и минимального значений на выбранной полусфере. Применение обоих эстиматоров к данным анизотропии СМВ, измеренной в двух экспериментах Planck и WMAP, позволило сравнить вариации фона на различных угловых масштабах. Показано, что на картах с разрешением $\ell \leq 100$ разделение на области с разным уровнем статистической анизотропии проходит близко к эклиптической плоскости, а после предварительного удаления гармоник $\ell \leq 20$ из данных СМВ начинает доминировать анизотропный сигнал, связанный с Галактикой.

Ключевые слова: *реликтовое излучение — методы: анализ данных*

1. ВВЕДЕНИЕ

Публикация данных космического эксперимента Planck первого и второго релиза подтвердила существование крупномасштабных (более 10°) аномалий в распределении космического микроволнового фонового излучения (Cosmic Microwave Background — СМВ) [1–5]. Асимметрия распределения сигнала между северным и южным галактическими полусферами [6, 7], Ось Зла [8, 9], Холодное Пятно [10–12], нарушение четности спектра мощности [3, 13, 14], были обнаружены ранее в наблюдательных данных космической миссии NASA WMAP [15, 16]. Проявление крупномасштабных аномалий в распределении сигнала, приводящих к различному распределению флуктуаций СМВ в разных направлениях, является признаком статистической анизотропии — особым типом негауссовости микроволнового фона [17]. Исторически проблема статистической анизотропии формулировалась с помощью спектра мощности распределения материи, который описывает такое распределение неоднородностей, когда первичные флуктуации (скалярные возмущения) локально гауссовы, но при этом их статистические гауссовы свойства отличаются по разным направлениям [18]. Сейчас задача исследования статистической анизотропии формулируется в обобщенном виде, где в

распределении фонового сигнала подразумевается следующее свойство коррелятора: $\langle a_{\ell m} a_{\ell' m'} \rangle \neq 0$ при $\ell \neq \ell'$ и/или $m \neq m'$ (см., например, [19]). В этом плане мы можем говорить уже не только о спектре мощности, но и использовать для анализа распределение положения пятен, что в частности, применяется в функционалах Минковского. Кроме того, в обобщенном определении статистической анизотропии можно изучать даже отдельные мультиполи, например, квадруполь [20]. И здесь среди простых методов анализа дисперсия или разброс (точнее, отношение соответствующих величин на разных полусферах) являются показательными характеристиками. В стандартной инфляционной космологической модели предполагается, что статистические свойства распределения реликтового излучения одинаковы по разным направлениям на больших (больше 10°) масштабах, т.е. микроволновый фон должен быть одновременно анизотропен (есть минимумы и максимумы на карте) и статистически изотропен. В случае статистической анизотропии, напротив, изучаются обусловленные разными факторами статистические свойства сигнала СМВ, различающиеся по разным направлениям на больших масштабах.

В литературе рассматривается несколько причин низкочастотных аномалий распределения сигнала на сфере, связанных с первичными магнитными полями и новой физикой [21–28], с излуче-

*E-mail: vo@sao.ru

нием Галактики [29–34], распределением вещества в Солнечной системе [35–41], методами обработки [42–47].

Для проверки гипотез, объясняющих эффекты наблюдаемой статистической анизотропии, проводят сравнение положения холодных и горячих пятен СМВ и выделенных направлений на небесной сфере, связанных, например, с ориентацией в галактической, эклиптической или экваториальной системах координат [8, 38], движением Местной группы галактик [3, 8] и крупномасштабным движением вещества [48–51]. Все эти подходы основаны на фундаментальной гипотезе о первичной статистической изотропии СМВ и поиске и объяснении нарушения изотропных свойств зарегистрированного излучения реликтового фона с помощью статистических алгоритмов — эstimаторов.

В предыдущих работах [40, 47] мы исследовали карты СМВ WMAP7 и Planck 1-го релиза, применив эstimаторы анизотропии, построенные с использованием углового спектра мощности C_ℓ и сравнения сигнала на всевозможных полусферах. Так как спектр мощности является инвариантом относительно вращения при вычислении на полной сфере, мы применили специальное преобразование распределения сигнала, которое зависит от поворота, тем самым меняя форму C_ℓ и позволяя с помощью спектра мощности построить производный эstimатор анизотропии для оценки сигнала в полусферах. В качестве такого преобразования мы использовали отображение сигнала одной полусферы на другую относительно экватора с положительным или отрицательным знаком.

Распределение величины оценки анизотропии, полученное в результате применения эstimаторов, свидетельствует о существовании статистической анизотропии, проявляющейся в низких мультиполях (см. результаты действия Σ_1 -эstimатора на рис. 1, воспроизводящем рис. 3 из работы [47]). Причем карта СМВ SMICA, восстановленная из многочастотных данных Planck, имеет те же особенности, что и данные микроволнового фона из архива WMAP [40]. В результате применения эstimаторов, построенных на минимизации вариации спектра мощности, обнаруживаются меньшие по относительной амплитуде различия (менее 15%) для данных WMAP девятого года наблюдений и Planck R1.0, чем у эstimатора, построенного на основе параметра четности, дающего относительную разность по минимальному и максимальному значениям порядка 40% для WMAP9 и Planck [47].

Следует отметить, что как октуполь СМВ, так и квадруполи и октуполи карт, построенных с помощью эstimаторов, указывают на ортогональное к эклиптике направление в анизотропном сигнале. Оно может быть связано либо с устойчивыми структурами, например, в области облака Оорта,

либо с воздействием солнечного ветра или магнитного поля солнечной системы. Проявление экваториальной системы в данных, полученных в точке L2, по-видимому, может указывать на воздействие на микроволновой сигнал излучения, связанного с Землей, через далекие лепестки диаграммы направленности антенны Planck. Кроме того, выводы о локальной природе статистической анизотропии, куда включены и эффекты систематики в наблюдениях и анализе данных, подтверждаются и простым сравнением карт СМВ, построенных по данным WMAP и Planck для мультиполей, различие мощности которых в спектре миссий наиболее заметно [52]. Отметим также, что предлагаемые эstimаторы используются скорее для выделения направления при разбиении сигнала на полусферы по его статистическим отличиям, чем для конкретной локализации (определения положения) статистически анизотропной области (отличающейся свойствами от других зон), как это делается, например, вейвлет-анализом [10] или разностью мультиполей [52].

В данной работе мы рассмотрим применение двух простых картографирующих эstimаторов сигнала на сфере, использующих оценки статистического разброса. Даже обычные карты, характеризующие уровень флуктуаций, демонстрируют не только анизотропию сигнала, но и ее неоднородность по направлению — статистическую анизотропию (рис. 2). Направления и области максимальной и минимальной анизотропии можно выделить, применив простейшие статистические методы. Описание предлагаемого нового подхода дано в следующем порядке. В разделе 2 мы излагаем метод построения двух эstimаторов (σ - и T -эstimаторы). В подразделах 2.1 и 2.2 мы приводим результаты их применения к данным космических миссий Planck и WMAP. В разделе 3 приводится обсуждение полученных результатов.

2. ЭСТИМАТОРЫ

Ниже предлагается упрощенный (и более быстрый в вычислениях) подход к исследованию статистической анизотропии в распределении сигнала между полусферами. Мы строим два безразмерных эstimатора, позволяющих делать двумерное преобразование карты неба на основе разброса значений карты. Первый, σ -эstimатор, представляет собой картографирующий алгоритм отношения величин разброса (стандартного отклонения) сигнала на северной и южной полусферах:

$$e_\sigma(\theta, \phi) = \frac{\sigma_{\theta, \phi}^{\text{North}}}{\sigma_{\theta, \phi}^{\text{South}}}. \quad (1)$$

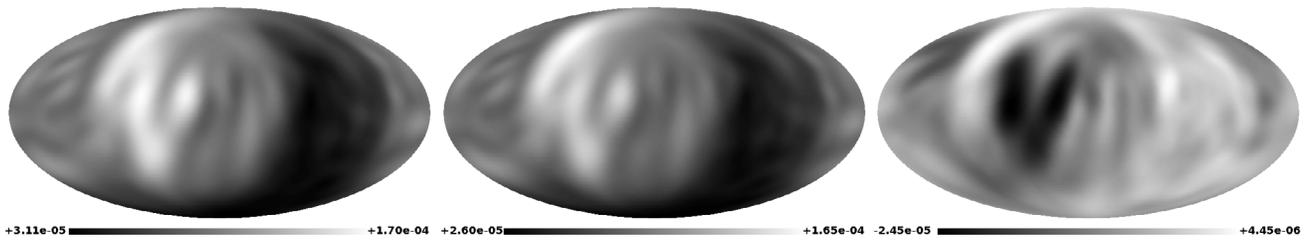


Рис. 1. Результаты построения Σ_1 -карты для данных WMAP9 (слева), Planck (в центре). Справа показана разность между обеими картами. Эстиматор построен на основе C_ℓ -спектра. Из работы [47].

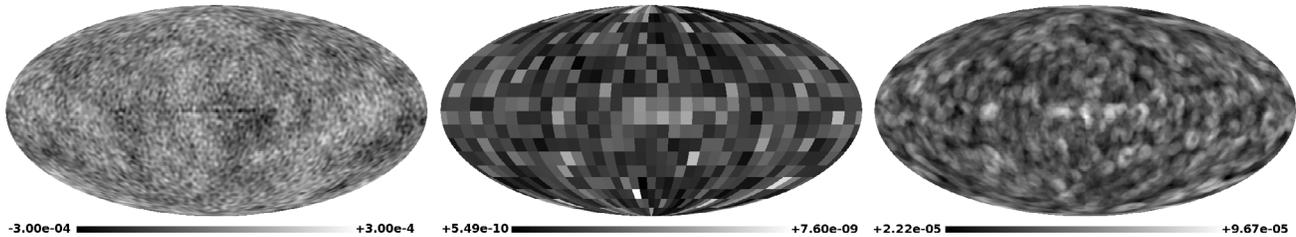


Рис. 2. Слева: карта СМВ SMICA [53] космической миссии Planck, сглаженная до углового разрешения 1° . В центре: мозаичная карта дисперсии, рассчитанной с разбиением карты СМВ SMICA на пиксели со стороной 10° . Справа: карта дисперсии СМВ SMICA, рассчитанной со скользящим окном $10^\circ \times 10^\circ$.

Здесь σ — стандартный разброс флуктуаций температуры СМВ. Верхние индексы North и South обозначают полусферы, на которых производится вычисление соответствующих значений σ . Нижние индексы θ и ϕ — полярные координаты, соответствующие углу поворота сферы и последующего разделения ее на северную и южную полусферы. Таким образом, каждому пикселу новой карты с координатами (θ, ϕ) ставится в соответствие величина отношения стандартного отклонения сигнала на северной и южной полусферах, на которые разделена сфера после поворота на угол, соответствующий координатам пиксела. Карты, построенные с помощью σ -эстиматора, будем называть σ -картами.

Существенным отличием предлагаемого σ -эстиматора от применяемых ранее, основанных на построении углового спектра мощности C_ℓ , является возможность использования данных без отображения одной полусферы на другую, как было ранее. В результате появляется выигрыш по времени (не требуется дополнительное разложение на гармоники при вычислении спектра) и не применяется операция генерации симметричных данных на сфере. Отношение разброса (как и дисперсии) сигнала на полусферах чувствительно и к малым, и к большим угловым масштабам. На рис. 3 и 4 приведены примеры влияния соответственно амплитуд квадруполя и октуполя на результирующую карту, создаваемую σ -эстиматором. При моделировании использовались следующие значения комплексных коэффициентов разложения на сферические гармоники:

для квадруполя — $a_{20} = (1.0, 0.0)$, $a_{21} = (1.0, 1.0)$ и $a_{22} = (0.0, 0.0)$, для октуполя — $a_{30} = (1.0, 0.0)$, $a_{31} = (1.0, 1.0)$ и $a_{32} = a_{33} = (0.0, 0.0)$. Обнуление мультиполей $Y_{\ell,m=\ell}$ позволяет минимизировать вклад галактической плоскости в применяемой модели. При генерировании случайной гауссовой карты использовался угловой спектр мощности C_ℓ в космологической модели Λ CDM. Моделирование по спектру мощности проводилось с помощью процедуры ‘c12map’ пакета GLESP¹ [54]. При этом увеличение амплитуды добавляемой гармоники модифицировало тестовую карту, внося в нее дополнительный искусственный негауссовый сигнал, отклоняющийся от ожидаемого в модели Λ CDM. На рис. 5 показан уровень влияния амплитуды квадруполя и октуполя на дисперсию новой карты, которую строит σ -эстиматор, для разных случайных гауссовых карт. Как видно из рис. 5, в принципе, могут реализовываться разные ситуации с добавлением сигнала к случайной карте: когда дисперсия уменьшается, т.е. наблюдается подавление низкочастотного сигнала (и потом с ростом вклада опять начинается рост дисперсии), и когда амплитуда искажений сразу увеличивается.

Второй эстиматор (Т-эстиматор) строится с использованием экстремальных статистик: картографирование оценки разброса проводится с помощью вычисления отношения разностей максимума и ми-

¹<http://www.glesp.nbi.dk>

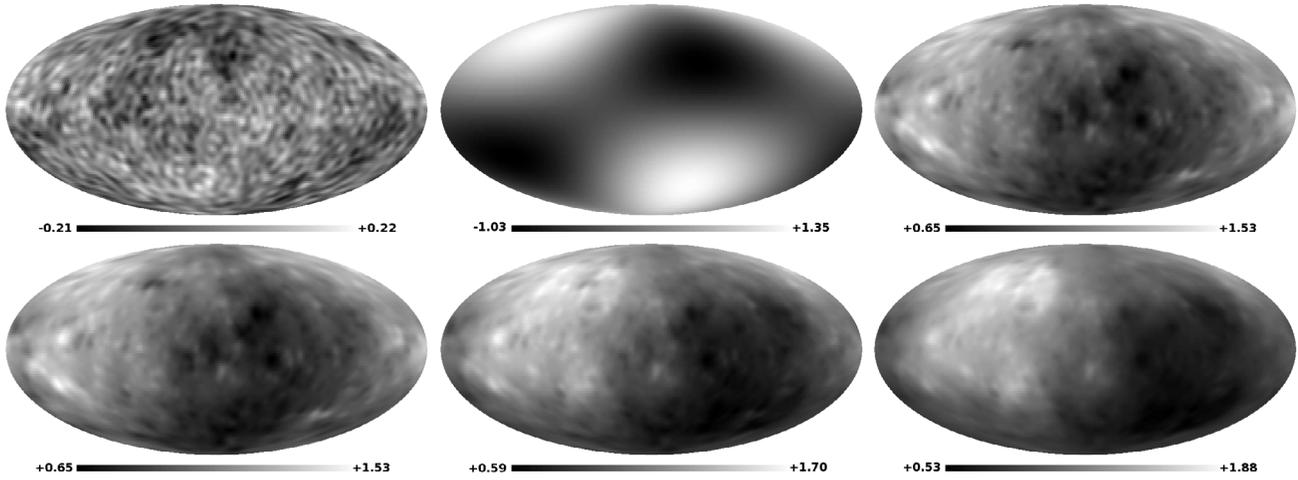


Рис. 3. Слева направо сверху вниз: пример карты случайной реализации $G_{\text{СМВ}}$ гауссова сигнала СМВ в космологии ΛCDM , карта добавляемого квадруполя к случайной реализации СМВ, карта σ -эstimатора для случайной гауссовой реализации (вклад квадруполя равен 0), карта σ -эstimатора для $G_{\text{СМВ}}$ с вкладом квадруполя $k = 0.1$, далее соответственно карты с $k = 1.0$ и 2.0 .

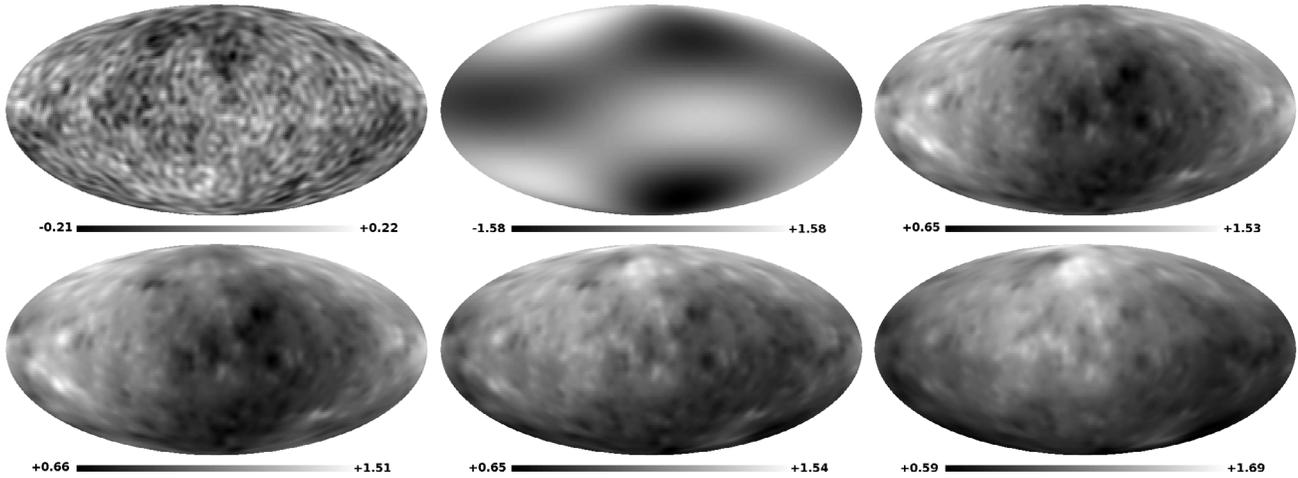


Рис. 4. Слева направо сверху вниз: пример карты случайной реализации $G_{\text{СМВ}}$ гауссова сигнала СМВ в космологии ΛCDM , карта добавляемого к случайной реализации СМВ октуполя, карта σ -эstimатора для случайной гауссовой реализации (вклад октуполя равен 0), карта σ -эstimатора для $G_{\text{СМВ}}$ с вкладом октуполя $k = 0.1$, далее соответственно карты с $k = 1.0$ и 2.0 .

нимума сигнала на соответствующих полусферах:

$$e_T(\theta, \phi) = \frac{(\max - \min)_{\theta, \phi}^{\text{North}}}{(\max - \min)_{\theta, \phi}^{\text{South}}}. \quad (2)$$

Этот эstimатор аналогичен представленному формулой (1), но вместо дисперсии сигнала в исследуемой области используется его максимальный разброс, описываемый разностью максимального и минимального значения в пикселях. Отметим, что подход построения эstimатора на основе экстремальных статистик ранее уже применялся для обнаружения источников [55, 56] и является непараметрическим методом [57]. Карты, построенные с помощью T-эstimатора, будем называть

T-картами. Особенность работы T-эstimатора и его отличие от σ -эstimатора заключается в выделении зон максимального разброса (по значению разности $(\max - \min)$ на заданной полусфере). Если при повороте сферы и дальнейшем разбиении ее по экватору на полусферы в областях сохраняются экстремальные значения, то величина экстремального разброса не меняется в отличие от стандарта (статистического разброса) или дисперсии. Применение такого эstimатора позволяет скачкообразно очертить границы чувствительности зон к изменению экстремальных статистических характеристик. На рис. 6, 7 и 8 приведены карты и вариации их чувствительности к негауссову вкладу,

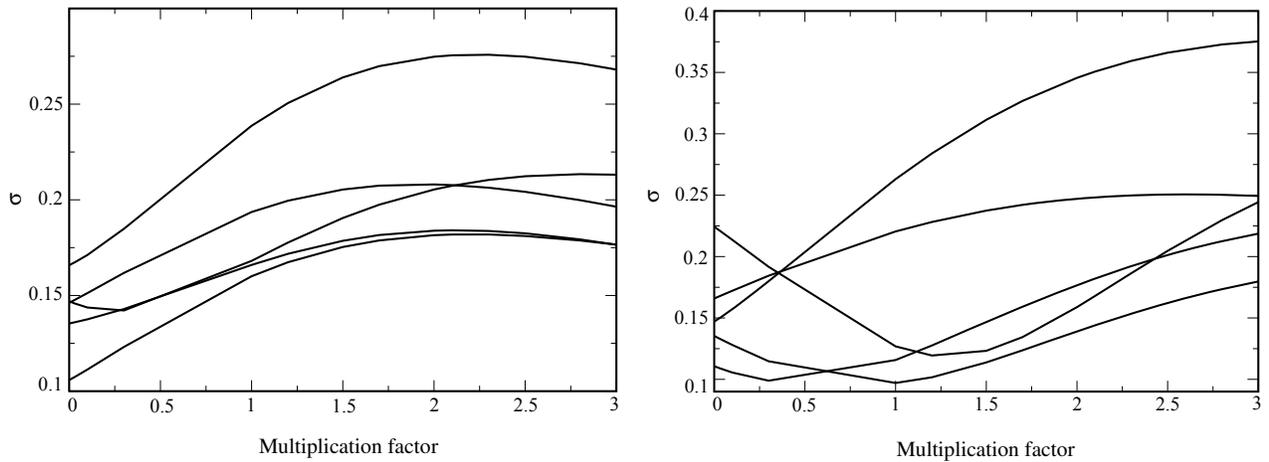


Рис. 5. Зависимость стандартного отклонения карты σ -эstimатора от добавленного негауссова вклада в гауссовый сигнал СМВ в космологии Λ CDM. Уровень добавочного сигнала в виде множителя для суммируемой дополнительной карты отражается по оси абсцисс. Слева добавочный сигнал в виде квадруполя, справа — в виде октуполя. Разные треки соответствуют разным гауссовым реализациям сигнала.

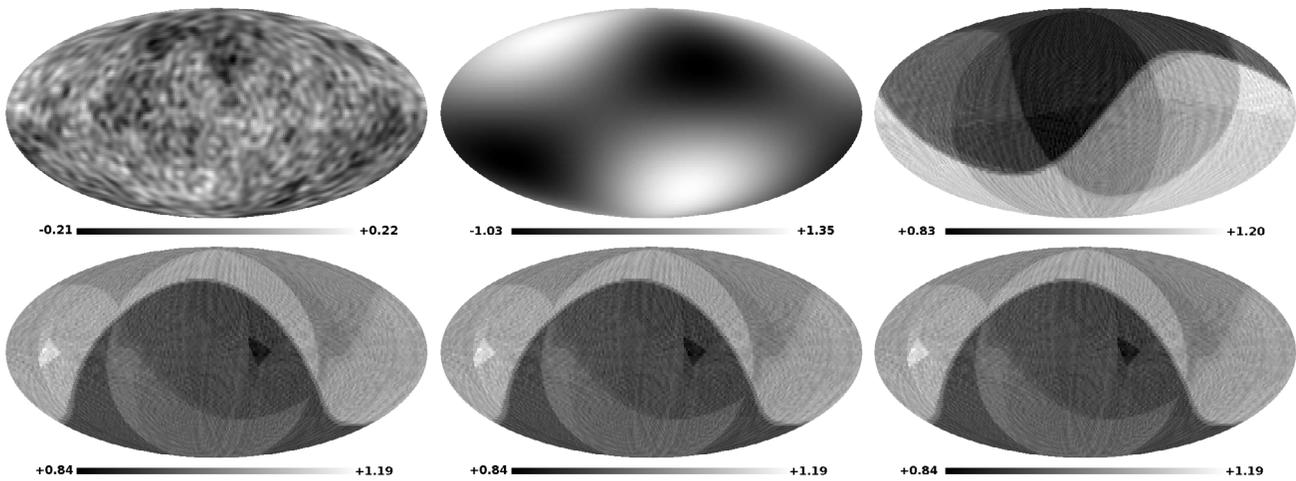


Рис. 6. Слева направо сверху вниз: пример карты случайной реализации $G_{\text{СМВ}}$ гауссова сигнала СМВ в космологии Λ CDM, карта добавляемого к случайной реализации СМВ квадруполя, карта Т-эstimатора для случайной гауссовой реализации (вклад квадруполя равен 0), карта Т-эstimатора для $G_{\text{СМВ}}$ с вкладом квадруполя $k = 0.1$, далее соответственно карты с $k = 1.0$ и 2.0 .

аналогичные описанным выше для σ -эstimатора (см. соответственно рис. 3, 4 и 5).

Таким образом, мы связываем разброс, рассчитываемый по предложенной методике, с пикселем карты, соответствующим данному повороту $(\Delta\theta, \Delta\phi)$. И результатом действия эstimатора является новая карта. Одно из важных свойств предложенного картографирующего эstimатора — возможность поиска выделенных направлений в распределении неоднородного сигнала на сфере, которые вычисляются как координаты максимумов и минимумов на картах низких гармоник. Далее мы

применяем этот метод к данным СМВ экспериментов Planck релиза R2.01 (использовалась карта СМВ SMICA) [53] и WMAP 9 [58]. Отметим, что задача, решаемая с помощью обоих эstimаторов, заключается не в определении уровня вариации сигнала и проверке на гауссовы статистические свойства, а в сравнении свойств восстановленных карт СМВ, полученных в экспериментах Planck и WMAP. Приведенные модели показали, что эstimатор чувствителен к начальным условиям (когда, например, добавочный негауссовый сигнал из-за случайности своего положения может подавлять

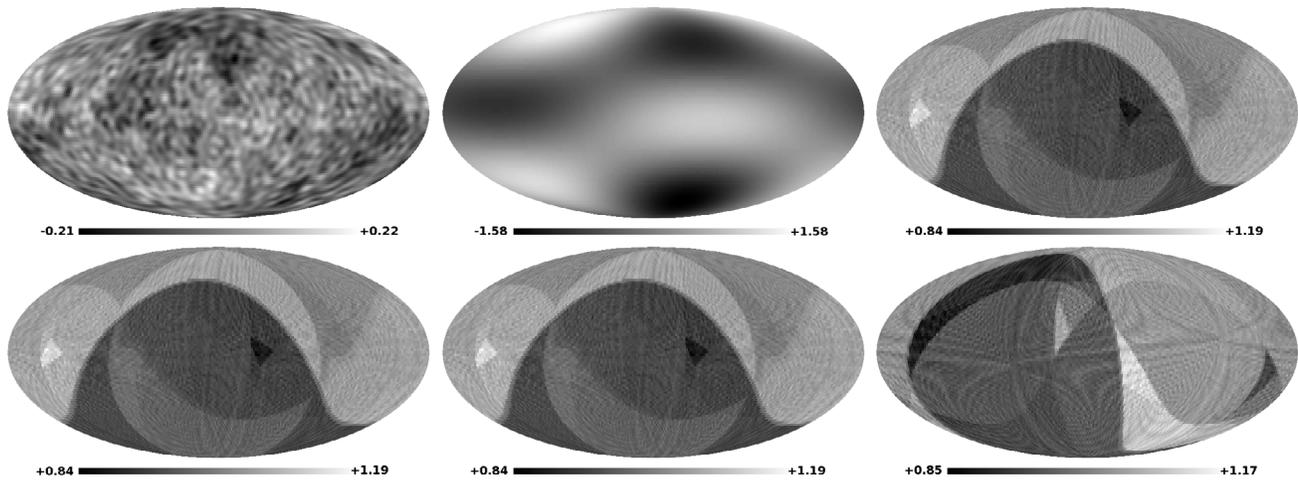


Рис. 7. Слева направо сверху вниз: пример карты случайной реализации G_{CMB} гауссова сигнала СМВ в космологии ΛCDM , карта добавляемого к случайной реализации СМВ октуполя, карта Т-эстиматора для случайной гауссовой реализации (вклад октуполя равен 0), карта Т-эстиматора для G_{CMB} с вкладом октуполя $k = 0.1$, далее соответственно карты с $k = 1.0$ и 2.0 .

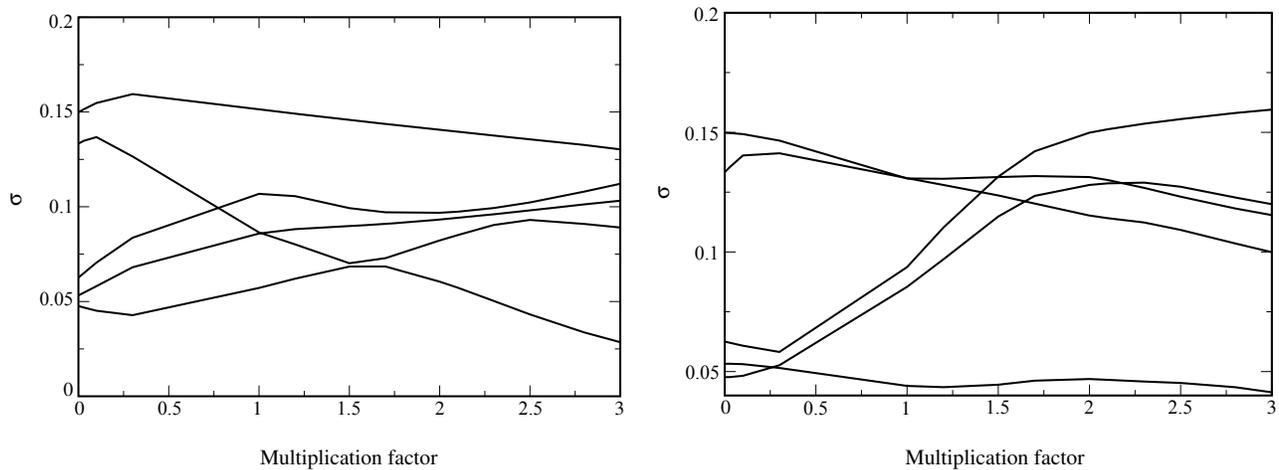


Рис. 8. Зависимость стандартного отклонения карты Т-эстиматора от добавленного негауссова вклада в гауссовый сигнал СМВ в космологии ΛCDM . Уровень добавочного сигнала в виде множителя для суммируемой дополнительной карты отражается по оси абсцисс. Слева добавочный сигнал в виде квадруполь; справа — в виде октуполя. Разные треки соответствуют разным гауссовым реализациям сигнала.

сигнал низких мультиполей в комбинации с фоном, но может его и усиливать), а рост искусственного сигнала будет приводить к росту отношения разбросов на разных полусферах. Этого достаточно, чтобы воспользоваться для анализа анизотропии полученными разностями распределения фона на полусферах карт различных экспериментов и выделить особые способы разбиения неба на полусферы с повышенным контрастом.

При анализе карт мы используем стандартное разложение анизотропии сигнала на сфере по сфе-

рическим гармоникам (мультиполям):

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi), \quad (3)$$

где ΔT — вариация температуры фона, θ и ϕ — полярные координаты, $Y_{\ell m}(\theta, \phi)$ — сферические функции, ℓ — номер сферической гармоники (мультиполя), m — номер моды мультиполя, $a_{\ell m}$ — комплексные коэффициенты при сферических гармониках². При разложении на гармоники

карт, построенных с помощью двумерных эстиматоров, будем использовать для обозначения номера мультиполя символ ‘L’.

Угловой спектр мощности в виде D_ℓ или C_ℓ мы вычисляем как $D(\ell) = \ell(\ell + 1)C_\ell/2\pi$, где

$$C_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2. \quad (4)$$

Для построения карт и анализа данных использовался пакет GLESP, в частности, процедуры ‘marrat’, ‘marcut’ и ‘difmap’ [54]. Были установлены следующие параметры разрешения производных карт эстиматора: число колец $N_x = 101$, число пикселей на экваторе $N_\phi = 202$. Для разбиения неба на всевозможные полусферы в рамках заданной пикселизации мы применили процедуру вращения сферы на углы (взятые с обратным знаком), которым соответствует положение пикселей как старой, так и новой карты. Величина отношения мер разброса на полусферах присваивалась пикселу новой карты, который соответствует углу поворота. Вращение сферы проводилось в гармонической области с применением рекуррентного алгоритма расчета гармоник Рисбо [60], реализованного в процедуре ‘difmap’. Перед использованием эстиматоров исходные карты СМВ сглаживались до разрешения $\ell_{\max} = 100$. В работе не применялись маски для экранирования Галактической плоскости.

2.1. Сравнение данных с помощью σ -эстиматора

Карты, построенные с помощью σ -эстиматора (выражение (1)) по данным Planck R2.01 и WMAP9, а также разности этих карт показаны на рис. 9. Разность карт показывает существенные различия (выше 10% в пикселях максимального различия сигналов) на σ -картах в данных WMAP9 и Planck R2.01. Значительная часть сигнала разности заключена в невязках с абсолютными максимумами амплитуд в эклиптическом диполе вблизи полюсов, а также в плоскости Галактики. Максимум отношения дисперсий на северной и южной полусферах ($r \simeq 2.3$ раза) достигается на σ -карте, построенной по данным с $\ell \leq 20$. Для карты с $\ell \leq 100$ эта величина равна $r = 1.61$, для карт с $\ell \in [21; 100]$ — $r = 1.24$. В разложении карты разности σ -анизотропии Planck R2.01 и WMAP9 сильные гармоники отражают ($L = 1, 2, 3, 5, 7, 9$) доминирующий сигнал (рис. 10), обусловленный,

по-видимому, систематическими эффектами, возникающими при наблюдениях и анализе данных. Отметим, что разность σ -карт Planck и WMAP содержит дипольную и квадрупольную гармоники с экстремумами, расположенными ближе к плоскости эклиптики или эклиптическим полюсам, чем сами данные Planck: например, у σ -карты, построенной по данным Planck, соответственно максимум и минимум диполя имеют эклиптические координаты:

$$(\lambda, \beta)_{\max, L1} = (242^\circ 868, 69^\circ 261)$$

$$(\lambda, \beta)_{\min, L1} = (62^\circ 868, -69^\circ 261).$$

У карты разности:

$$(\lambda, \beta)_{\max, L1}^D = (45^\circ 391, -81^\circ 667)$$

$$(\lambda, \beta)_{\min, L1}^D = (225^\circ 392, 81^\circ 667),$$

что на $12^\circ 3$ ближе к эклиптическим полюсам, чем карта Planck. Похожая ситуация для квадрупольных компонент: для σ -карты Planck имеем

$$(\lambda, \beta)_{\max 1, L2} = (68^\circ 894, -66^\circ 749),$$

$$(\lambda, \beta)_{\max 2, L2} = (248^\circ 894, 66^\circ 749),$$

$$(\lambda, \beta)_{\min 1, L2} = (344^\circ 973, 2^\circ 125) \text{ и}$$

$$(\lambda, \beta)_{\min 2, L2} = (62^\circ 868, -2^\circ 125).$$

Для карт разности —

$$(\lambda, \beta)_{\max 1, L2}^D = (347^\circ 275, 4^\circ 898),$$

$$(\lambda, \beta)_{\max 2, L2}^D = (167^\circ 275, -4^\circ 898),$$

$$(\lambda, \beta)_{\min 1, L2}^D = (56^\circ 864, -74^\circ 628) \text{ и}$$

$$(\lambda, \beta)_{\min 2, L2}^D = (236^\circ 864, 74^\circ 628).$$

Важно также отметить, что практически в плоскости эклиптики лежат и скопление в Деве (координаты приведены для M 87):

$$(\lambda, \beta)_{\text{VirgoA}} = (182^\circ 059, 14^\circ 417),$$

и диполь СМВ (координаты максимума):

$$(\lambda, \beta)_{\max, L1 \text{СМВ}} = (136^\circ 591, -5^\circ 428).$$

Предварительное удаление аномальных низких гармоник ($\ell \leq 20$) до применения σ -эстиматора позволяет избежать влияние сигнала, связанного с эклиптической плоскостью. На рис. 11 показаны карты, построенные с помощью σ -эстиматора (выражение (1)) по данным Planck R2.01 и WMAP9 из диапазонов мультиполей $21 \leq \ell \leq 50$, $21 \leq \ell \leq 100$ и $51 \leq \ell \leq 100$, а также разности карт этих экспериментов. Как видно из рисунков, сигнал с максимальной амплитудой и на σ -картах обоих экспериментов, и на соответствующих картах разности сконцентрирован в плоскости Млечного Пути с выделенным центром Галактики.

2.2. Сравнение данных с помощью T -эстиматора

T -эстиматор (выражение (2)) выделяет области неба с пиковыми значениями температуры, при этом уровни вычисляемого T -сигнала между зонами меняются скачкообразно в отличие от результатов применения описанного выше σ -эстиматора.

²Коэффициенты разложения по мультиполям микроволновых карт WMAP и Planck доступны на сайте <http://cmb.sao.ru> [59].

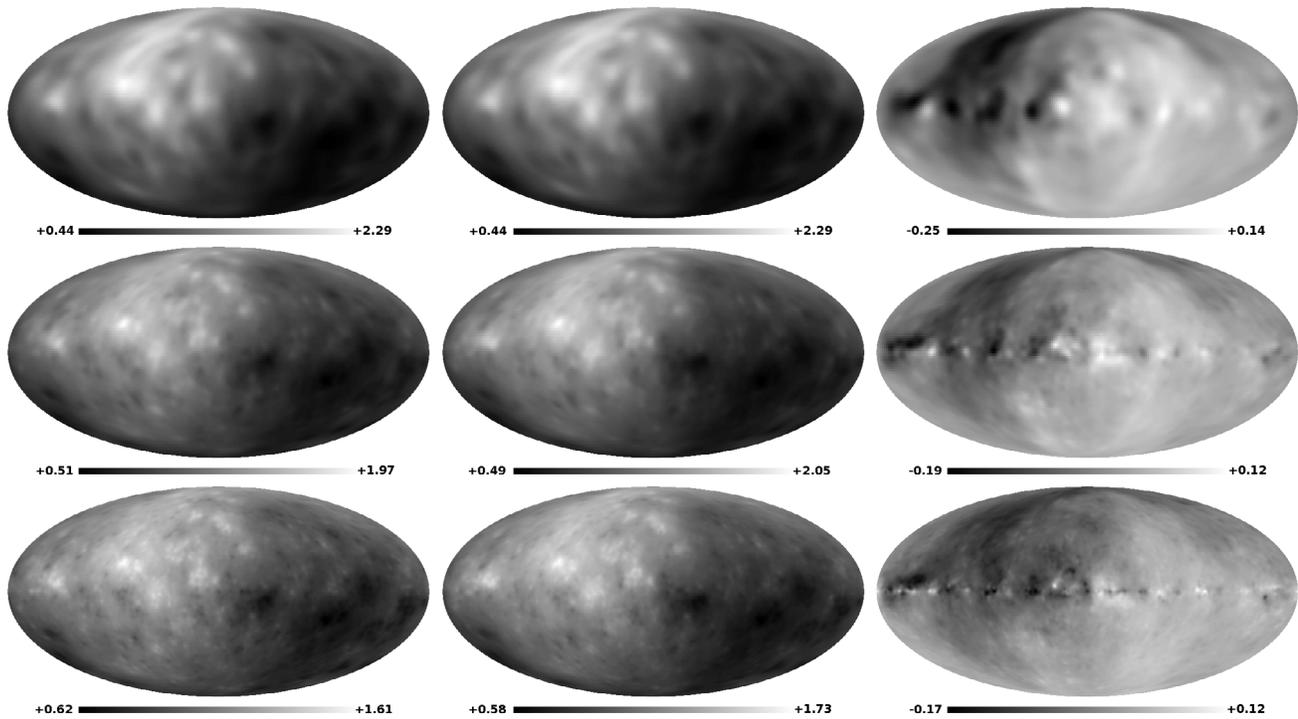


Рис. 9. Карты σ -анизотропии, построенные с помощью σ -эстиматора, для данных SMICA Planck 2.01 (слева) и WMAP9 (в центре), а также разность этих карт (справа). Верхний ряд: исходные карты СМВ, содержащие только мультиполи $\ell \leq 20$. Средний ряд: исходные карты СМВ с гармониками $\ell \leq 50$. Нижний ряд: $\ell \leq 100$.

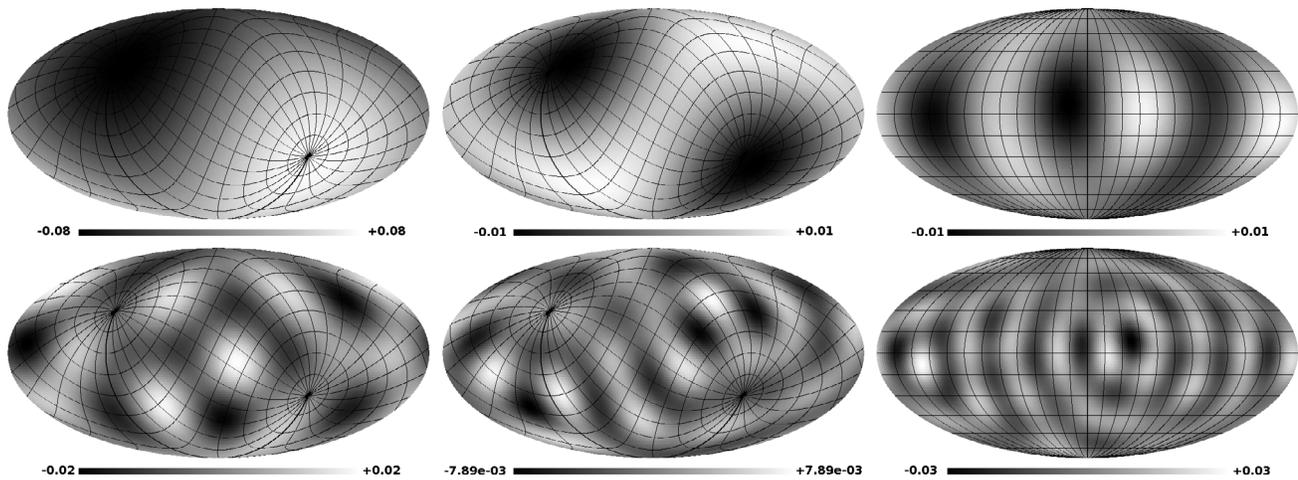


Рис. 10. Сильные гармоники карты разности σ -анизотропии, построенные по данным SMICA Planck R2.01 и WMAP9 для $\ell \leq 100$. Слева направо сверху вниз: гармоники $L = 1, 2, 3, 5, 7, 9$. На карты мультиполей $L = 1, 2, 5, 7$ наложена экваториальная сетка координат, на карты с $L = 3, 9$ — галактическая.

Для T-карт отношение разброса на северной и южной полусферах ниже, чем у σ -карт: по данным с $\ell \leq 20$ — $r = 1.44$, для карты с $\ell \leq 100$ эта величина равна $r = 1.19$, а для карт с $\ell \in [21; 100]$ — $r = 1.27$.

Отметим, что T-карты, построенные по данным с гармониками $\ell \leq 50$, имеют четкую разделительную границу на уровне значения 1, когда максимальные разбросы в южной и северной полусфе-

рах равны. Эта граница, с одной стороны, очень близка к плоскости эклиптики (см. рис. 12), хотя и отличается от нее, а с другой стороны, ее отличие таково, что центр местного скопления галактик в Деве, куда движется наша система, лежит в этой плоскости. Можно отметить, что разделение неба на полусферы в подходе с вычислением отношений максимального разброса, вероятно, включает

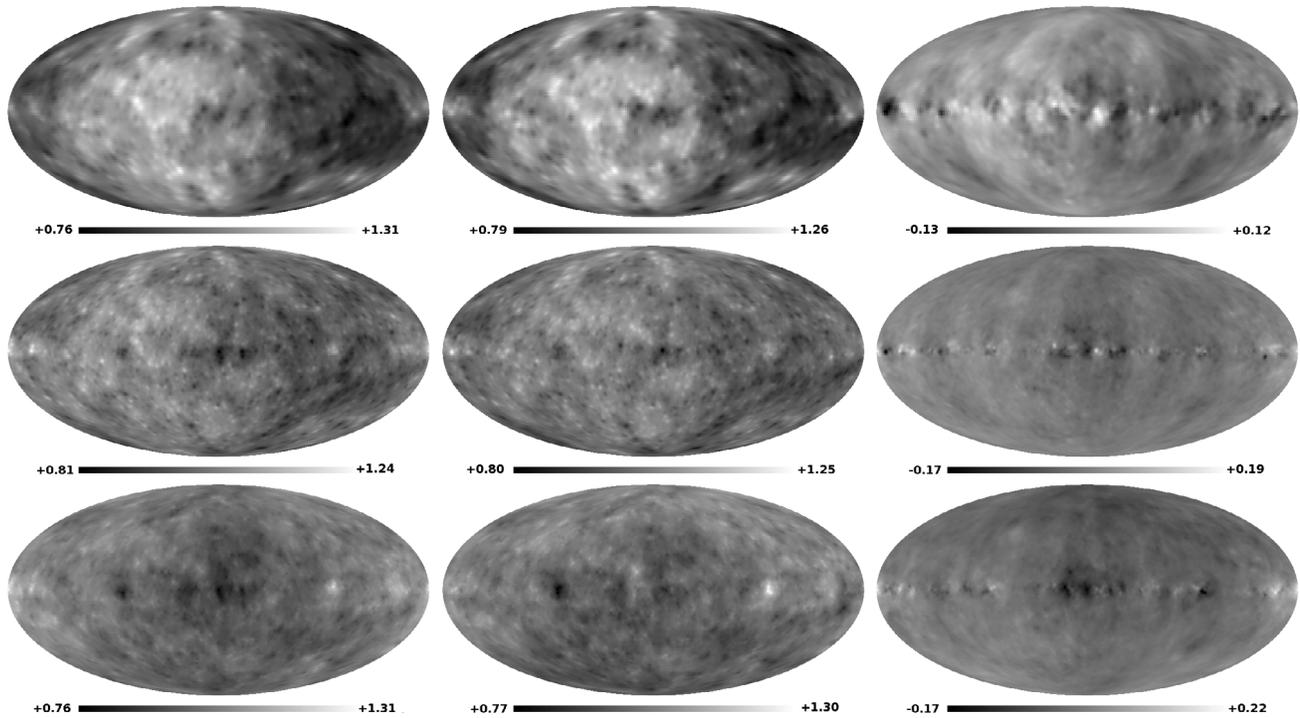


Рис. 11. Карты σ -анизотропии, построенные с помощью σ -эстиматора, для данных SMICA Planck 2.01 (слева) и WMAP9 (в центре), а также разность этих карт (справа). Верхний ряд: исходные карты СМВ, содержащие только мультиполи $21 \leq \ell \leq 50$. Средний ряд: исходные карты СМВ с гармониками $21 \leq \ell \leq 100$. Нижний ряд: $51 \leq \ell \leq 100$.

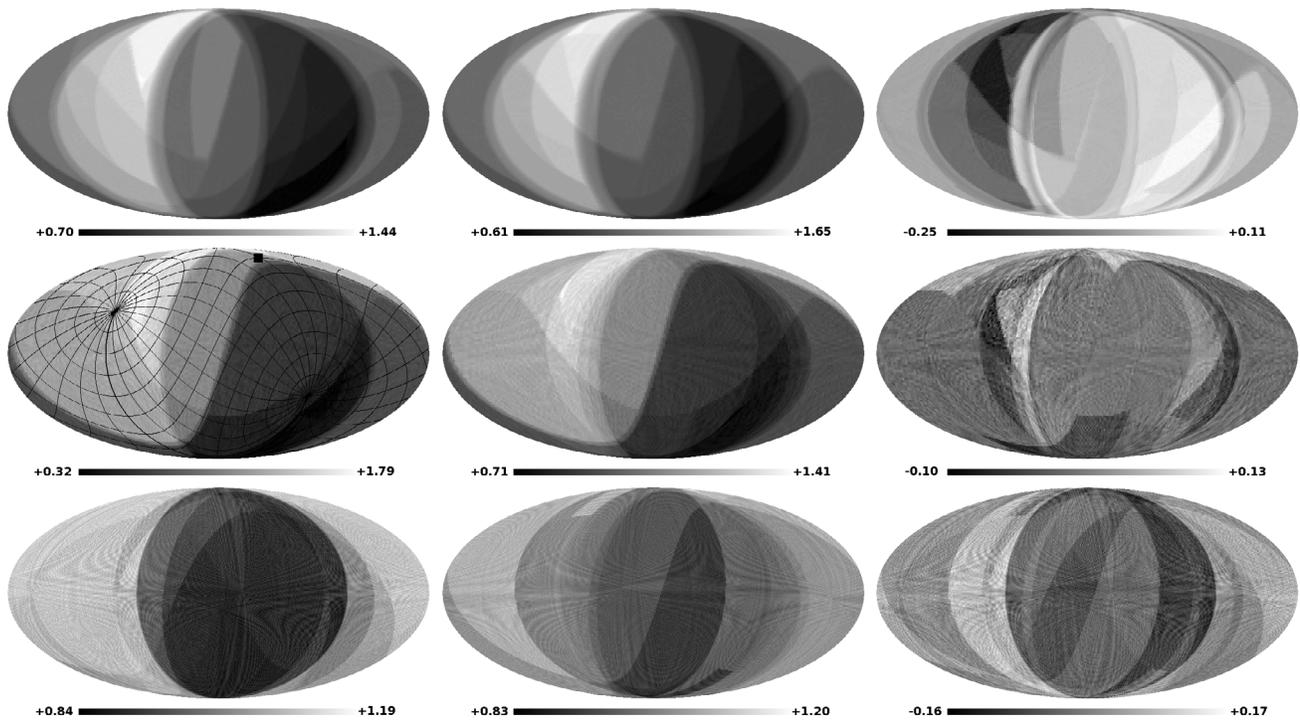


Рис. 12. Карты T -анизотропии, построенные с помощью T -эстиматора, для данных SMICA Planck R2.01 (слева) и WMAP9 (в центре), а также разность этих карт (справа). Верхний ряд: исходные карты СМВ, содержащий только мультиполи $\ell \leq 20$. Средний ряд: исходные карты СМВ с гармониками $\ell \leq 50$. Нижний ряд: $\ell \leq 100$. На карту Planck с мультиполями $\ell \leq 50$ наложена координатная сетка эклиптической системы (средний ряд, левый рисунок), и черным квадратом отмечено положение центра скопления Дева.

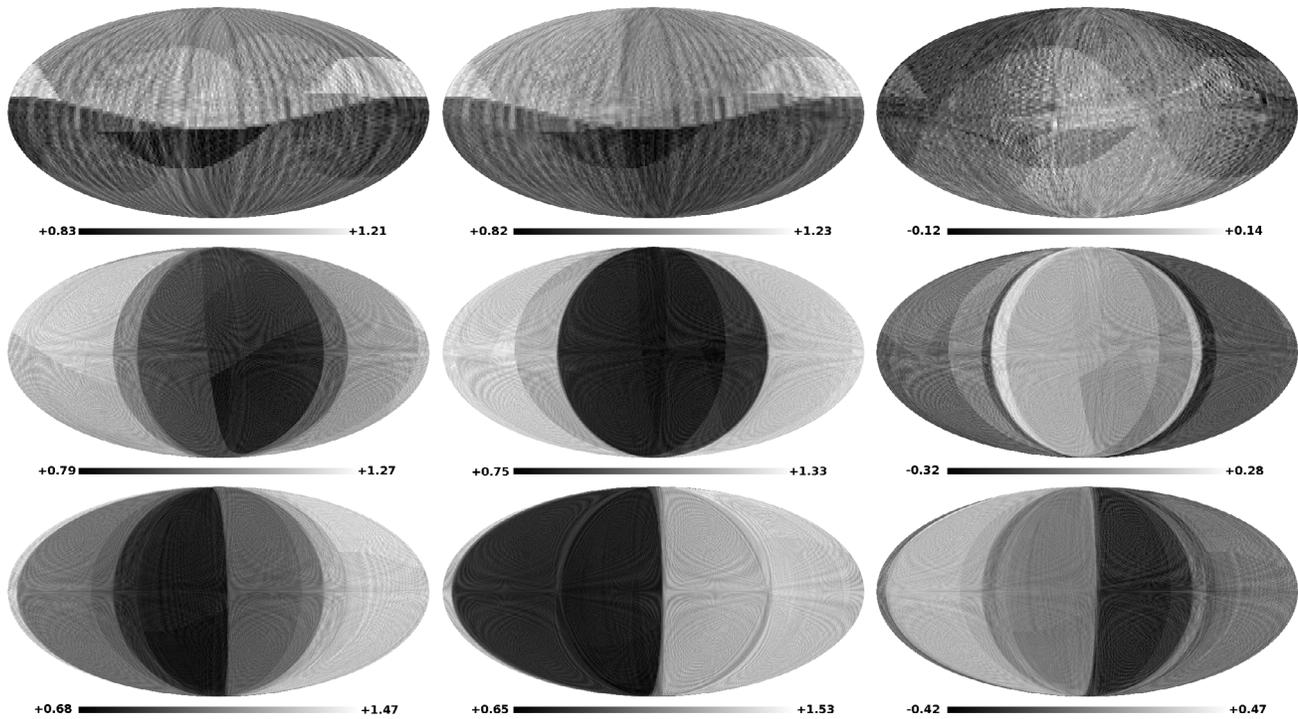


Рис. 13. Карты Т-анизотропии, построенные с помощью Т-эстиматора, для данных SMICA Planck R2.01 (слева) и WMAP9 (в центре), а также разность этих карт (справа). Верхний ряд: исходные карты СМВ, содержащие только мультиполи $21 \leq \ell \leq 50$. Средний ряд: исходные карты СМВ с гармониками $21 \leq \ell \leq 100$. Нижний ряд: $51 \leq \ell \leq 100$.

особенности и эклиптической системы координат, и движения нашей системы.

Удаление низких гармоник сохраняет Т-анизотропию, связанную с излучением Галактики (см. рис. 13), как это происходило и для σ -карт (рис. 11). На картах с гармониками $\ell > 20$ граница анизотропии проходит в плоскости Галактики. На картах с гармониками $\ell > 50$ выделяется диполь, центрированный на центр Галактики. Эти факты говорят о том, что при удалении аномальных низких гармоник из исходных данных статистическая анизотропия все равно сохраняется, и она связана с распределением протяженного микроволнового сигнала в нашей Галактике, в то время как для низких гармоник ($\ell < 20$) природа статистически анизотропного сигнала другая.

На рис. 14 приведены сравнительный спектры мощности σ - и Т-карт, представляющие собой отношений спектров мощности соответствующих карт, построенных по данным Planck R2.01 и WMAP9.

Для примера также приведем фазовые характеристики σ -карт, построенных по данным СМВ с $\ell \leq 50$. Фаза некоторой гармоники карты $Y_{\ell m}$ описывается параметром $\phi_{\ell m}$ в комплексном представлении коэффициентов разложения $a_{\ell m} = |A_{\ell m}| \exp(i\phi_{\ell m})$. На рис. 15 показано распределение величины синусов фаз гармоник σ -карт

по данным Planck и WMAP, а также на модельных картах СМВ в Λ CDM-космологии.

Как видно из рис. 15, в распределении синусов фаз имеется локальный максимум в области абсцисс около 0.43 на уровне 3σ . Гармоники, соответствующие этому пику, показаны на рис. 16 и отражают осесимметричный и центрально-симметричный сигнал, содержащийся в σ -карте в силу ее построения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы предложили два новых двумерных эстиматора разброса для анализа карт СМВ. Предложенные эстиматоры представляют собой алгоритм картографирования отношения величин разброса измеренного сигнала СМВ на северной и южной полусферах в зависимости от способа разбиения (а именно, поворота и разрезания) неба на полусферы. Разброс в одном случае оценивается как стандартное отклонение σ , в другом случае — как разность максимального и минимального значений на выбранной полусфере. Применение обоих эстиматоров для данных анизотропии СМВ, измеренной в двух экспериментах Planck и WMAP, позволяет сравнивать вариации фона на различных угловых масштабах. Было показано, что

- уровень анизотропии микроволнового фона на северной и южной полусферах различен;

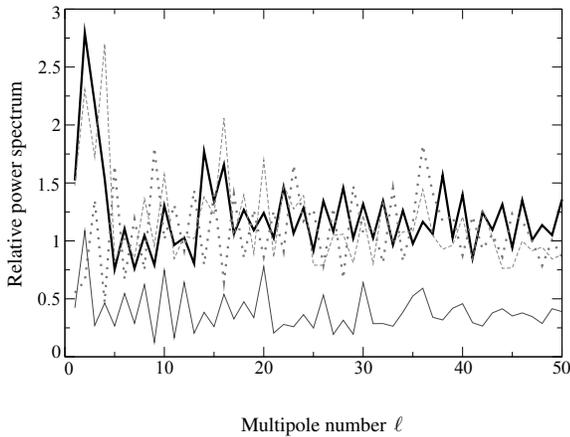


Рис. 14. Угловые спектры мощности карт, построенных после действия σ - и T -эстиматоров над картами SMICA Planck R2.01, содержащих гармоники $20 < \ell \leq 50$ и $20 < \ell \leq 100$, отнесенные к аналогичным спектрам, построенным по данным WMAP9. Толстой черной сплошной линией показано отношение спектров мощности C_L σ -карт Planck и WMAP, построенным по данным СМВ из диапазона мультиполей $\ell \in [21-50]$. Толстая пунктирная линия демонстрирует отношение C_L T -карт Planck и WMAP с $\ell \in [21-50]$. Тонкая штриховая соответствует отношению спектров C_L σ -карт Planck и WMAP с $\ell \in [21-100]$, а тонкая сплошная — отношению спектров C_L T -карт Planck и WMAP с $\ell \in [21-100]$.

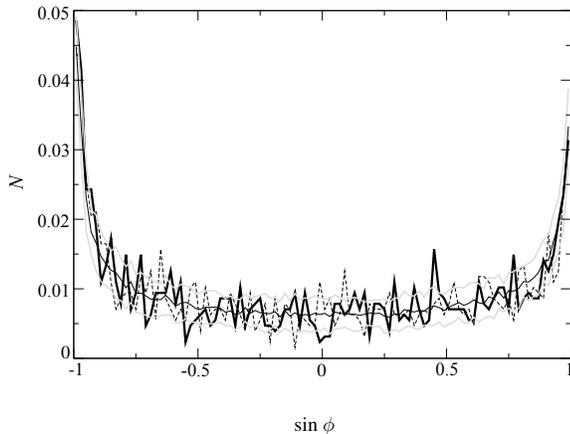


Рис. 15. Распределение величины синусов фаз гармоник σ -карт, построенных по данным СМВ с $\ell \leq 50$. Толстой сплошной линией показаны величины для σ -карты Planck, штриховой линией — WMAP, тонкой сплошной линией — средняя оценка величины по 50 моделям гауссова сигнала СМВ в Λ CDM-космологии, серыми линиями — 1σ разброс величины по результатам моделирования. В области величины синуса фаз, равного примерно 0.43, имеется локальный максимум для данных Planck на уровне порядка 3σ от ожидаемого среднего значения.

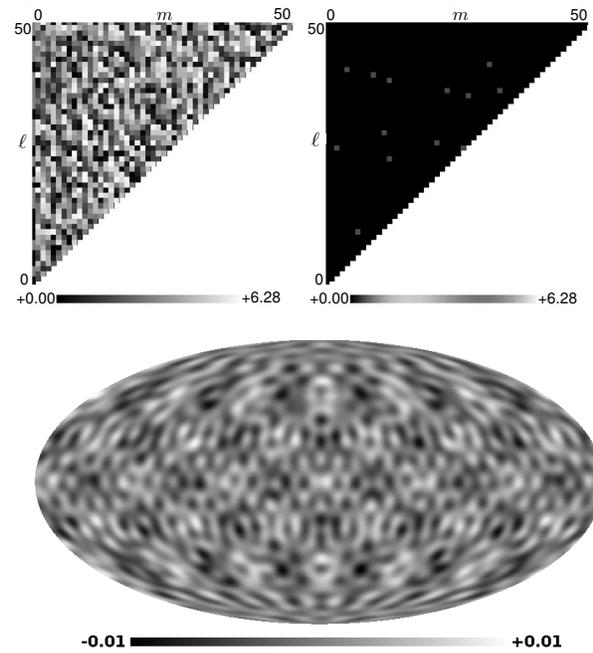


Рис. 16. Картографирование выделенных гармоник. Слева: набор фаз гармоник σ -карты, построенной по данным Planck. В центре — выделенные из фазовой диаграммы фазы гармоник, соответствующих локальному максимуму в распределении на рис. 15 в области около 0.43. Справа: карта выделенных гармоник на сфере.

- на картах с разрешением $\ell \leq 100$ разделение на области с разным уровнем анизотропии проходит близко к эклиптической плоскости;
- предварительное удаление гармоник $\ell \leq 20$ из данных СМВ и дальнейшее применение эстиматоров приводит к выделению анизотропного сигнала, связанного с Галактикой;
- в данных обеих космических обсерваторий присутствует как эклиптический, так и галактический статистически анизотропный сигнал;
- карты разности также содержат оба типа анизотропии.

Обнаруженная ранее статистическая анизотропия, связанная с эклиптической системой координат [35–38, 41, 45, 47, 61, 62], подтверждается в данной работе. Однако, как здесь обсуждалось, наряду с эклиптическим анизотропным сигналом присутствует и более слабый сигнал, имеющий, скорее всего, галактическое происхождение. Пересечение этих полусфер выделяет южный правый квадрант, отмеченный в работе [5]. В этом квадранте находятся Холодное Пятно [10] и пятна квадруполя и октуполя СМВ, формирующие Ось Зла.

Если происхождение галактического анизотропного сигнала можно теоретически связать с систематическими эффектами разделения компонент (например, присутствия аномального микроволнового излучения, или неполным учетом сигнала, проникающего через дальние лепестки диаграммы направленности антенны телескопа), то анизотропный сигнал, связанный с эклиптической, может включать дополнительно и диполь, обусловленный движением нашей Галактики [63]. Отметим также, что сохраняется небольшая вероятность того, что обнаруженная статистическая анизотропия, признаком которой является Ось Зла, чувствительная к эклиптической системе координат, может иметь космологическое происхождение, определяемое, например, топологией [64, 65].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В. Н. Черненкову за ценные замечания и рекомендации, позволившие улучшить текст и представление результатов в данной работе. Авторы также выражают свою благодарность за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных NASA обсерватории WMAP и ESA обсерватории Planck в Planck Legacy Archive. Для анализа протяженного излучения на сфере в работе использован пакет GLESP [54, 66, 67].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, A1 (2014).
2. R. Adam et al. (Planck Collab.), arXiv:1502.01582.
3. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, A23 (2014).
4. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, 3458 (2015).
5. L. Santos, P. Cabella, T. Villela, et al., *Astron. and Astrophys.* **569**, A75 (2014).
6. H. K. Eriksen, F. K. Hansen, A. J. Banday, et al., *Astrophys. J.* **605**, 14 (2004).
7. A. Mariano and L. Perivolaropoulos, *Phys. Rev. D* **87**, 043511 (2013).
8. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, *Phys. Rev. D* **68**, 123523 (2003).
9. K. Land and J. Magueijo, *Phys. Rev. Letters* **95**, 071301 (2005).
10. M. Cruz, E. Martínez-González, P. Vielva, and L. Cayón, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356**, 29 (2005).
11. M. Cruz, N. Turok, P. Vielva, et al., *Science* **318**, 1612 (2007).
12. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 101 (2010).
13. J. Kim and P. Naselsky, *Astrophys. J. Letters* **714**, L265 (2010).
14. M. Hansen, A. M. Frejsel, J. Kim, et al. *Phys. Rev. D* **83**, 103508 (2011).
15. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 17 (2011).
16. A. Gruppuso and C. Burigana, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **8**, 004 (2009).
17. O. V. Verkhodanov, *Physics Uspekhi* **55**, 1098 (2012).
18. D. S. Gorbunov and V. A. Rubakov, *Introduction to the theory of the early universe* (Moscow, Krasand, 2010; Singapore, World Scientific, 2011).
19. M. Libanov, S. Ramazanov, and V. Rubakov, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **6**, 010 (2011).
20. S. Ramazanov and G. Rubtsov, *Phys. Rev. D* **89**, 043517 (2014).
21. T. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., *Astrophys. J. Letters* **629**, L1 (2005).
22. M. Demiański and A. G. Doroshkevich, *Phys. Rev. D* **75**, 123517 (2007).
23. A. Mack, T. Kahniashvili, and A. Kosowsky, *Phys. Rev. D* **65**, 123004 (2002).
24. P. D. Naselsky, L.-Y. Chiang, P. Olesen, and O. V. Verkhodanov, *Astrophys. J.* **615**, 45 (2004).
25. T. Kahniashvili and B. Ratra, *Phys. Rev. D* **71**, 103006 (2005).
26. M. Libanov, S. Mironov, and V. Rubakov, *Phys. Rev. D* **84**, 083502 (2011).
27. S. R. Ramazanov and G. I. Rubtsov, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **5**, 033 (2012).
28. H. Liu, A. M. Frejsel, and P. Naselsky, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **7**, 032 (2013).
29. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, *Astrophys. J. Letters* **599**, L53 (2003).
30. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **349**, 695 (2004).
31. L. La Porta, C. Burigana, W. Reich, and P. Reich, *Astron. and Astrophys.* **479**, 641 (2008).
32. O. V. Verkhodanov and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 1 (2012).
33. O. V. Verkhodanov, T. V. Keshelava, and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 245 (2012).
34. M. Hansen, W. Zhao, A. M. Frejsel, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **426**, 57 (2012).
35. J. M. Diego, M. Cruz, J. González-Nuevo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402**, 1213 (2010).
36. V. Dikarev, O. Preuß, S. Solanki, et al., *Astrophys. J.* **705**, 670 (2009).
37. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **64**, 263 (2009).
38. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **65**, 390 (2010).
39. V. S. Berkutov, Ya. V. Naiden, and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 87 (2010).
40. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 345 (2011).
41. M. Hansen, J. Kim, A. M. Frejsel, et al., *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **10**, 059 (2012).

42. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov and M. T. B. Nielsen, *Astrophysical Bulletin* **63**, 216 (2008).
43. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *International Journal of Modern Physics D* **17**, 179 (2008).
44. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 203 (2007).
45. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418**, 505 (2011).
46. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, *Phys. Rev. D* **83**, 043002 (2011).
47. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 408 (2014).
48. A. Kashlinsky, F. Atrio-Barandela, H. Ebeling, et al., *Astrophys. J. Letters* **712**, L81 (2010).
49. F. Atrio-Barandela, A. Kashlinsky, H. Ebeling, et al., *Astrophys. J.* **719**, 77 (2010).
50. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **66**, 183 (2011).
51. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **561**, A97 (2014).
52. O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 350 (2014).
53. R. Adam et al. (Planck Collab.), arXiv:1502.05956 (2015).
54. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
55. O. V. Verkhodanov and V. L. Gorokhov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **39**, 155 (1995).
56. O. V. Verkhodanov and D. A. Pavlov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **49**, 45 (2000).
57. V. S. Shergin, O.V. Verkhodanov, V. N. Chernenkov, et al., *ASP Conf. Ser.*, **125**, 182 (1997).
58. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 20 (2013).
59. O. V. Verkhodanov, Ya. V. Naiden, V. N. Chernenkov, and N. V. Verkhodanova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 113 (2014).
60. T. Risbo, *J. Geodesy* **70**, 383 (1996).
61. D. J. Schwarz, C. J. Copi, D. Huterer, and G. D. Starkman, arXiv:1510.07929 (2015).
62. O. V. Verkhodanov, *Physics Uspekhi* **59**, 3 (2016).
63. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), arXiv:1506.07135 (2015).
64. R. Aurich, H. S. Janzer, S. Lustig, and F. Steiner, *Classical and Quantum Gravity* **25**, 125006 (2008).
65. P. Bielewicz and A. Riazuelo, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **396**, 609 (2009).
66. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *International Journal of Modern Physics D* **14**, 275 (2005).
67. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *International Journal of Modern Physics D* **20**, 1053 (2011).

A Comparison of Anisotropic Statistical Properties of CMB Maps Based on the WMAP and Planck Space Mission Data

V. O. Verkhodanov and Ya. V. Naiden

We compare the anisotropic properties of the cosmic microwave background (CMB) maps constructed based on the data of NASA's WMAP (9th year of observations) and ESA's Planck (2015 release) space missions. In our analysis, we use two two-dimensional estimators of the scatter of the signal on a sphere, which amount to algorithms of mapping the ratio of the scatter in the Northern and Southern hemispheres depending on the method of dividing (specifically, rotating and cutting) the sky into hemispheres. The scatter is computed either as a standard deviation σ , or as the difference between the minimum and maximum values on a given hemisphere. Applying both estimators to the CMB anisotropy data measured by two space missions, Planck and WMAP, we compared the variations of the background at different angular scales. Maps with a resolution of $\ell \leq 100$ show that the division into regions with different levels of statistical anisotropy lies close to the ecliptic plane, and after preliminary removal of the $\ell \leq 20$ harmonics from the CMB data, the anisotropic signal related to the Galaxy begins to dominate.

Keywords: cosmic microwave background radiation—methods: data analysis