

УДК 524.827-1

## ДВУМЕРНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЭСТИМАТОРЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ И ПОИСК ВЫДЕЛЕННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ДАННЫХ МИССИИ PLANCK

© 2014 Я. В. Найден\*, О. В. Верходанов\*\*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 25 февраля 2014 года; принята в печать 5 августа 2014 года

Описывается метод анализа однородности карт микроволнового фона, основанный на поведении углового спектра мощности  $C(\ell)$  и параметра четности  $P$ . Эстиматор построен с использованием изменения дисперсии спектра мощности полусферы фонового сигнала и позволяет представить статистическую анизотропию в виде новой карты, характеризующей однородность/неоднородность фона во втором порядке. С помощью предложенного метода проведен анализ данных спутников WMAP девятого года наблюдений и Planck первого релиза для карт с разрешением  $\ell \leq 100$ . В результате обнаружена асимметрия сигнала карты микроволнового фона, связанная с эклиптической системой координат как в плоскости эклиптики, так и в ортогональном направлении. Обсуждаются проблемы генерирования анизотропного сигнала.

Ключевые слова: реликтовое излучение — методы: анализ данных

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Публикация данных космического эксперимента Planck подтвердила существование крупномасштабных (менее  $10^\circ$ ) аномалий в распределении космического микроволнового фонового излучения (Cosmic Microwave Background — СМВ) [1–4]. Эти аномалии — асимметрия распределения сигнала между северным и южным галактическими полусферами [5, 6], «Ось зла» [7, 8], «Холодное пятно» [9–11], нарушение четности спектра мощности [2, 12, 13] — были обнаружены ранее в наблюдательных данных миссии WMAP [14, 15]. Проявление крупномасштабных аномалий в распределении сигнала, приводящих к различному распределению флуктуаций СМВ в разных направлениях, является признаком статистической анизотропии, особым типом негауссовости микроволнового фона [16].

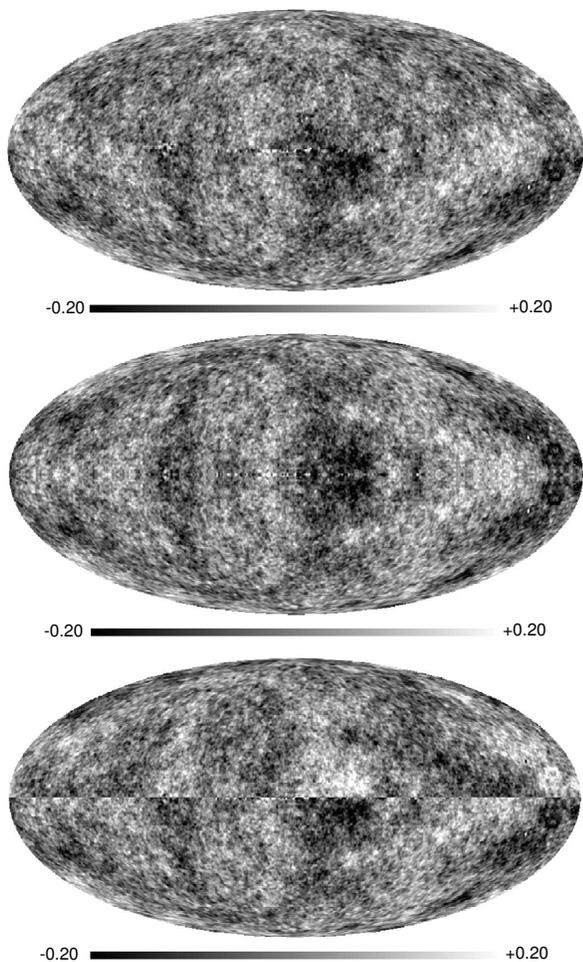
В литературе рассматривается несколько причин низкочастотных аномалий распределения сигнала на сфере, связанных с первичными магнитными полями и новой физикой [17–24], с излучением Галактики [25–30], распределением вещества в Солнечной системе [31–37], методами обработки [38–42].

Для проверки разных гипотез, объясняющих эффекты наблюдаемой статистической анизотропии, проводят сравнение положения холодных и горячих пятен СМВ и выделенных направлений на небесной сфере, например, ориентации в галактической, эклиптической или экваториальной системах координат [7, 34], движение Местной группы галактик [2, 7] и крупномасштабные движения вещества [43–46]. 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 — эстиматоров.

В работе [36] мы предложили новый метод анализа однородности карт микроволнового фона, основанный на изменении формы углового спектра мощности  $C(\ell)$  преобразованной карты, построенной в результате всевозможных разбиений сферы на две полусферы, и сравнения спектров мощности сигнала на соответствующих взаимотоотраженных полусферах. Эта операция аналогична вращению сферы с дальнейшим отображением сигнала относительно экватора для заданных углов вращения и вычислению углового спектра мощности. Метод основывается на измерении дисперсии спектра мощности для разных полусфер, содержащих фоновый сигнал, что позволяет исследовать слабые неоднородности второго порядка. Для визуализации эффектов был предложен способ картографии

\*E-mail: yarnaid@mail.ru

\*\*E-mail: vo@sao.ru



**Рис. 1.** Сверху вниз: карта сигнала микроволнового фона WMAP ILC7, карта с четным отображением ILC7 южной полусферы и карта с нечетным отображением.

рования подобного изменения дисперсии и представления его в виде новой карты (так называемой  $\Sigma$ -карты) на сфере. Для чисто гауссового сигнала  $\Sigma$ -карта имеет равномерно распределенные положения экстремумов на сфере. Таким образом, отклонение этого распределения от равномерного является индикатором негауссовости, а для низких гармоник — признаком статистической анизотропии распределения фонового излучения. Кластеризация экстремумов, определяющая поведение низких гармоник, позволяет выделить области и гармоники, искажающие однородный сигнал. Было показано, что на карте ILC WMAP седьмого года наблюдений обнаруживаются признаки статистической анизотропии, связанные с эклиптической плоскостью. А в сочетании с аналогичными  $\Sigma$ -картами для сигнала канала  $W$  (94 ГГц) был сделан вывод о существовании на высоких частотах дополнительной компоненты сигнала, приводящей к данной неоднородности [36].

Отметим, что чувствительность сигнала СМВ к эклиптической системе координат наблюдалась и ранее, причем ее выделенность была зарегистрирована во множестве тестов [34, 36, 47–49]. Среди стандартных физических объяснений этого явления упоминаются (1) движение Местной группы галактик [7], так как скопление Девы лежит близко к плоскости эклиптики, (2) неучтенный сигнал в Солнечной системе [37].

В данной работе мы развиваем предложенные алгоритмы, добавляя проверку на четность спектра, и применяем этот подход в анализе данных космического эксперимента Planck.

## 2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Самой важной статистической характеристикой сигнала на сфере является угловой спектр мощности, форму которого определяют физические условия в ранней Вселенной и с помощью которого с высокой точностью измеряются космологические параметры. Угловой спектр мощности уже применялся [5] для фиксации наблюдаемой неоднородности распределения сигнала между северным и южным галактическими полушариями. Позднее в работах [12, 50, 51], а также в данных миссии Planck [2] было показано, что спектр мощности является чувствительным и к негауссовым свойствам принимаемого сигнала. Для выявления этих свойств авторы ввели новую меру, вычисляемую как отношение сумм четных и нечетных мультиполей  $\ell$ . Было обнаружено доминирование нечетных гармоник в данных WMAP СМВ на интервале  $2 \leq \ell \leq 18$ , где отношение сигнал/шум около 100, в отличие от модельных карт со случайным сигналом. Такое поведение этой характеристики может быть вызвано как привнесенными негауссовыми свойствами, включающими асимметрию диаграммы направленности, шум, фоновые компоненты, наложение масок и т.п., так и нетривиальной космологией.

Для анализа спектра мощности мы используем разложение сигнала по сферическим гармоникам в виде

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi), \quad (1)$$

где  $\Delta T$  — вариация температуры фона,  $\theta$  и  $\phi$  — полярные координаты,  $Y_{\ell m}(\theta, \phi)$  — сферические функции,  $\ell$  — номер сферической гармоники (мультиполя),  $m$  — номер моды мультиполя,  $a_{\ell m}$  — комплексные коэффициенты при сферических гармониках. Соответственно коэффициенты  $a_{\ell m}$  вычисляются как

$$a_{\ell m} = \int_{-1}^1 dx \int_0^{2\pi} \Delta T(x, \phi) Y_{\ell m}^*(x, \phi) d\phi, \quad (2)$$

где символ “\*” обозначает комплексное сопряжение. Угловым спектром мощности в виде  $D_\ell$  или  $C_\ell$  мы вычисляем как  $D(\ell) = \ell(\ell + 1) C_\ell / 2\pi$ , где

$$C_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2. \quad (3)$$

Несмотря на то, что угловым спектром мощности является инвариантом относительно вращения при вычислении на полной сфере, на его основе, тем не менее, можно построить алгоритмы поиска нарушения изотропии и использовать их для обнаружения и оценки уровня статистической анизотропии сигнала в разных полусферах (см., например, [36]). Для этой цели необходимо произвести такое преобразование распределения сигнала, которое зависит от поворота. Подобным преобразованием может быть отображение сигнала одной полусферы на другую относительно экватора с положительным или отрицательным знаком (см. соответствующие карты на рис. 1 и угловые спектры мощности на рис. 2). При положительном отображении контраст между максимумами и минимумами на разных полусферах уменьшается (распределение становится более изотропным), а при отрицательном — увеличивается. В работе [36] мы построили и проверили два эstimатора для четырех новых карт, построенных с помощью следующих преобразований распределения сигнала на сфере. Для северного полушария  $T_{\text{south}}(-\theta, \phi) = T_{\text{north}}^{\text{init}}(\theta, \phi)$  или, с изменением знака на противоположный,  $T_{\text{south}}(-\theta, \phi) = -T_{\text{north}}^{\text{init}}(\theta, \phi)$ , где нижний индекс при  $T$  обозначает часть сферы, а верхний «init» — исходное распределение на сфере. В первом случае получаем четное отображение, во втором — нечетное. Аналогично строится отображение для юга:  $T_{\text{north}}(\theta, \phi) = T_{\text{south}}^{\text{init}}(-\theta, \phi)$  или, с изменением знака на противоположный,  $T_{\text{north}}(\theta, \phi) = -T_{\text{south}}^{\text{init}}(-\theta, \phi)$ . В результате мы получаем четыре отображения сигнала на сфере: два четных (обозначим их для краткости  $T^{n,e}$  и  $T^{s,e}$ ) и два нечетных ( $T^{n,o}$  и  $T^{s,o}$ ). Соответствующие им угловые спектры мощности для четного сигнала  $C^{n,e}(\ell)$  и  $C^{s,e}(\ell)$ , для нечетного —  $C^{n,o}(\ell)$  и  $C^{s,o}(\ell)$ .

Теперь, используя производные карты СМВ, построенные при различных углах поворота  $\Delta\theta$  и  $\Delta\phi$ , можно вычислить соответствующие спектры мощности. В работе [36] было предложено использовать две меры неоднородности углового спектра мощности в некотором диапазоне мультиполей  $\ell \leq \ell_{\text{max}}$ :

$$M_1 = \varsigma(\{D^{x,d}(\ell)\}), \quad (4)$$

$$M_2 = \varsigma(\{D^{n,d}(\ell) - D^{s,d}(\ell)\}),$$

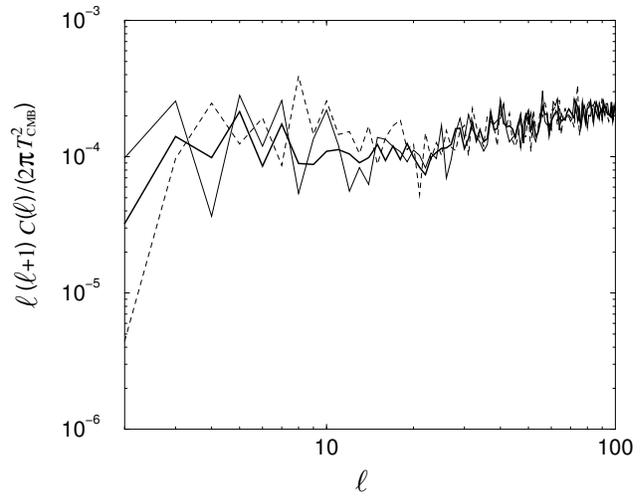


Рис. 2. Угловые спектры мощности сигнала микроволнового фона WMAP ILC7 (яркая сплошная линия), карты с четным отображением ILC7 на южной полусфере (тонкая сплошная линия) и карты с нечетным отображением (штриховая линия).

на основании которых строятся эstimаторы. Здесь  $\varsigma(\cdot)$  — оператор вычисления дисперсии множества из  $\ell_{\text{max}}$  элементов — точек спектра, фигурные скобки  $\{\}$  обозначают массив элементов,  $x$  — верхний индекс: « $n$ » для севера или « $s$ » для юга,  $d$  — верхний индекс, обозначающий « $e$ » (четная карта) или « $o$ » (нечетная карта). Т.е. мера  $M_1$  является просто дисперсией  $\sigma_{C_\ell}^2$  значений на спектре мощности карты, вычисленном для отображенных полусфер, а мера  $M_2$  характеризует разброс спектра отображенных карт одной четности. Для идеальной карты, т.е. карты в простой  $\Lambda$ CDM-космологической модели, можно предположить, что дисперсия значений спектра мощности — мера  $M_1$  — будет минимальной из-за ожидаемой в теории гладкости спектра мощности, и мера  $M_2$  также должна стремиться к минимуму из-за однородности гауссова сигнала в обеих полусферах. Отметим, что в идеальном случае вместо  $\varsigma(\{D^{x,d}(\ell)\})$  следует применять относительную величину  $\varsigma(\{D^{x,d}(\ell)\}/D_{\text{real}}(\ell))$ , а вместо  $\varsigma(\{D^{n,d}(\ell) - D^{s,d}(\ell)\})$  использовать  $\varsigma(\{(D^{n,d}(\ell) - D^{s,d}(\ell))/D_{\text{real}}(\ell)\})$ , где  $D_{\text{real}}(\ell)$  — реальный спектр мощности. Рассматривая в первом приближении  $D_{\text{real}}(\ell)$  для низких мультиполей ( $\ell \leq 10$ ) как постоянную величину с малыми вариациями, мы можем перейти к эstimаторам на основе мер, задаваемых выражениями (4). В данной работе мы строим также третью меру, основанную на параметре четности [12] в виде

$$M_3 = P^+ / P^-, \quad (5)$$

где

$$P^+ = \sum_{\text{even } \ell < \ell_{\max}} \ell(\ell+1) C_\ell / 2\pi,$$

$$P^- = \sum_{\text{odd } \ell < \ell_{\max}} \ell(\ell+1) C_\ell / 2\pi.$$

Изменение разбиений на полусферы проводится простым вращением сферы в полярных координатах с дальнейшим вычислением мер  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  и присвоением их величины соответствующим пикселям карты. Таким образом, можно создать соответствующие карты  $\Sigma_1(\Delta\theta, \Delta\phi)$ ,  $\Sigma_2(\Delta\theta, \Delta\phi)$  и  $P(\Delta\theta, \Delta\phi)$ , где при заданном повороте  $(\Delta\theta, \Delta\phi)$  проводятся операции разделения сферы по экватору, отображения карты и вычисления меры. С учетом вращательной симметрии карты отображения север—юг переходят друг в друга при повороте на  $180^\circ$ . Карты  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$  являются характеристиками однородности сигнала СМВ, а в случае существования неоднородности — индикаторами положения областей с возмущающим сигналом.

Зависимость углового спектра мощности, рассчитываемого по предложенной методике, а значит, и мер, построенных на его основе, позволяет связать уровень вариации спектра с пикселем карты, соответствующим данному повороту  $(\Delta\theta, \Delta\phi)$ . Таким образом, результатом действия эstimатора является новая карта. Одно из важных свойств предложенного картографирующего эstimатора [36] — возможность поиска выделенных направлений в распределении неоднородного сигнала на сфере, которые вычисляются как координаты максимумов и минимумов на картах низких гармоник. Далее мы развиваем предложенный метод и применяем его к данным СМВ миссии Planck.

Для построения карт и анализа данных использовался пакет GLESP<sup>1</sup> в частности, процедуры `maprat`, `mapcut` и `difmap` [52]. Были установлены следующие параметры разрешения производных карт эstimатора: число колец  $N_x = 201$ , число пикселей на экваторе  $N_\phi = 402$ . Для разбиения неба на всевозможные полусферы в рамках заданной пикселизации мы применили процедуру вращения сферы на углы, которым соответствует положение пикселей как старой, так и новой карты. Для каждого поворота сфера разделялась по экватору, проводилось отображение одной полусферы на другую в соответствии с выбранным алгоритмом, вычислялись спектр мощности и связанная с ним мера. Величина меры присваивалась пикселу новой карты, соответствующему углу поворота. Вращение сферы проводилось в гармонической области с применением рекуррентного алгоритма расчета

гармоник Рисбо [53], реализованного в процедуре `difmap`.

Для анализа сигнала мы использовали карты с нечетным отображением по двум причинам: (1) сигнал СМВ является в основном нечетным, т.е. в нем доминируют нечетные гармоники  $(\ell + m)$  [12, 35, 54]; (2) контрастность нечетной  $\Sigma$ -карты выше, чем четной, в то время как дисперсия распределения сигнала на обеих картах близка. Отметим, что в эstimаторах, построенных на мерах  $M_1$  и  $M_2$ , можно применить как угловые моменты  $C_\ell$ , так и  $D_\ell$ . Оба случая ( $C_\ell$  и  $D_\ell$ ) также рассмотрены ниже.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном анализе мы использовали карты СМВ, построенные в эксперименте Planck [1] и WMAP девятого года наблюдений [55]. Для карт, полученных в результате применения нашего набора эstimаторов, был проведен сравнительный анализ и выделены основные низкомультипольные компоненты.

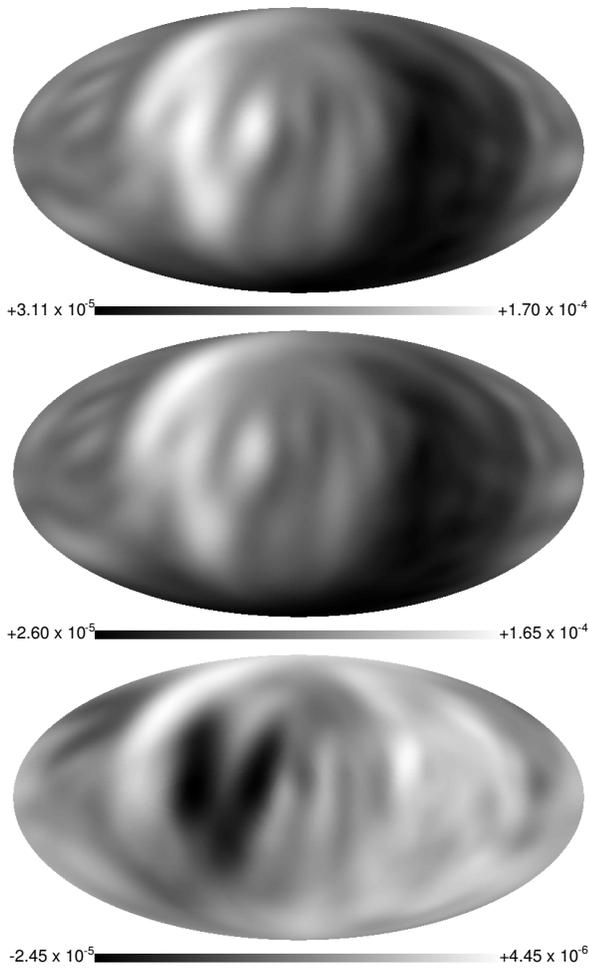
На рис. 3 показаны результаты применения эstimатора на основе спектра  $C_\ell$  и построения  $\Sigma_1$ -карты по данным WMAP девятого года наблюдений и Planck. На нижнем рисунке приведена карта разности между обоими распределениями сигнала. Диполь  $\Sigma_1$ -карты, построенной для распределения СМВ Planck, показан на Рис. 4.

Отметим, что применение в  $\Sigma_1$ -методе спектра мощности  $C(\ell)$  позволяет отобразить гармоники, наиболее отклоняющиеся от ожидаемых при однородном распределении. Т.е. выравнивание для  $C_\ell$ -спектра, в отличие от  $D_\ell$ , выделяет такие низкие гармоники, которые формируют наибольшее отклонение от среднего значения  $C_\ell$  в выбранном диапазоне  $\ell$ . Это демонстрирует рис. 5, где показан октуполь  $\Sigma_1$ -карты, рассчитанной для данных СМВ Planck. Для сравнения также приведен октуполь карты СМВ SMICA Planck. Корреляция обоих октуполей равна  $-0.73$ . Отметим также, что экстремумы октуполя  $\Sigma_1$ -карты СМВ Planck расположены на одном эклиптическом меридиане.

Использование углового спектра мощности в форме  $D_\ell$ , который имеет плато на низких мультиполях (рис. 2), позволяет выделить неоднородности меньших угловых масштабов (рис. 6) за счет усиленного калибровкой  $\ell(\ell+1)$  вклада более высоких гармоник.

Положение минимума диполя (рис. 7) имеет галактические координаты  $(l, b) = (351^\circ 94', 9^\circ 83')$ . Отметим, что в близкой области находится и максимум дипольной компоненты (с координатами  $(18^\circ 37', 14^\circ 19')$ ) распределения сигнала СМВ в

<sup>1</sup><http://www.glesp.nbi.dk>

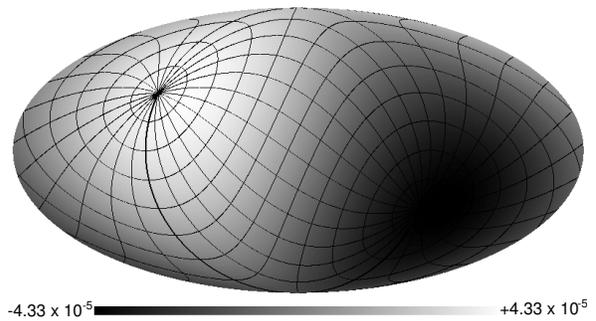


**Рис. 3.** Результаты построения  $\Sigma_1$ -карты для данных WMAP9 (вверху), Planck (в центре). На нижнем рисунке показана разность между обеими картами. Эстиматор построен на основе  $C_\ell$ -спектра.

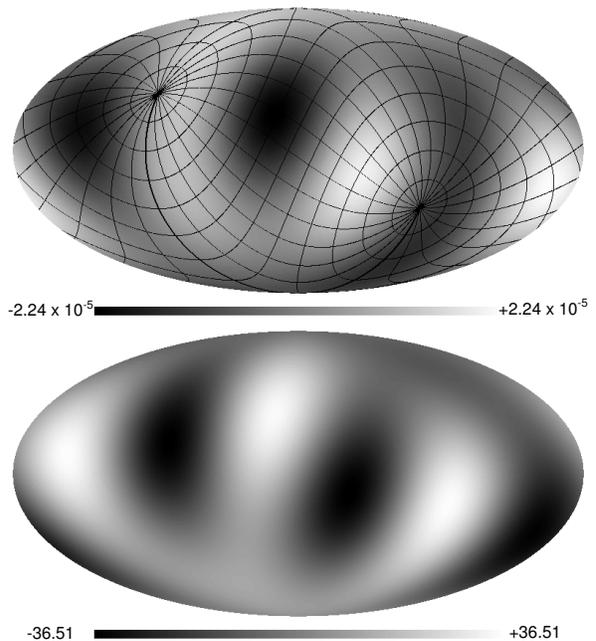
направлении на внегалактические радиоисточники [45]. Положение максимума диполя по данным СМВ в проекционных площадках вокруг радиогалактик определяется распределением сигнала СМВ в околוגалактической области. Оба диполя, по-видимому, формируются остаточными пятнами «галактических» гармоник, сохранившихся после восстановления сигнала СМВ в области северного галактического пузыря, обнаруженного в данных спутника Fermi [56, 57], ограниченного галактическими широтами  $|b| < 30^\circ$  и долготами  $|l| \sim 15\text{--}20^\circ$ .

Другое расположение пятен демонстрирует октуполь (рис. 8). На  $\Sigma_1$ -карте, построенной с помощью эстиматора на основе  $D_\ell$ -спектра, можно обнаружить влияние внешнего сигнала на СМВ в двух координатных системах, показанных на этом же рисунке.

Как видно из рис. 8, где показана  $\Sigma_1$ -карта с  $D_\ell$ -основанием, пятна октуполя располагают-



**Рис. 4.** Карта диполя  $\Sigma_1$ -карты для данных эксперимента Planck (рис. 3). Приведена сетка эллиптической системы координат.

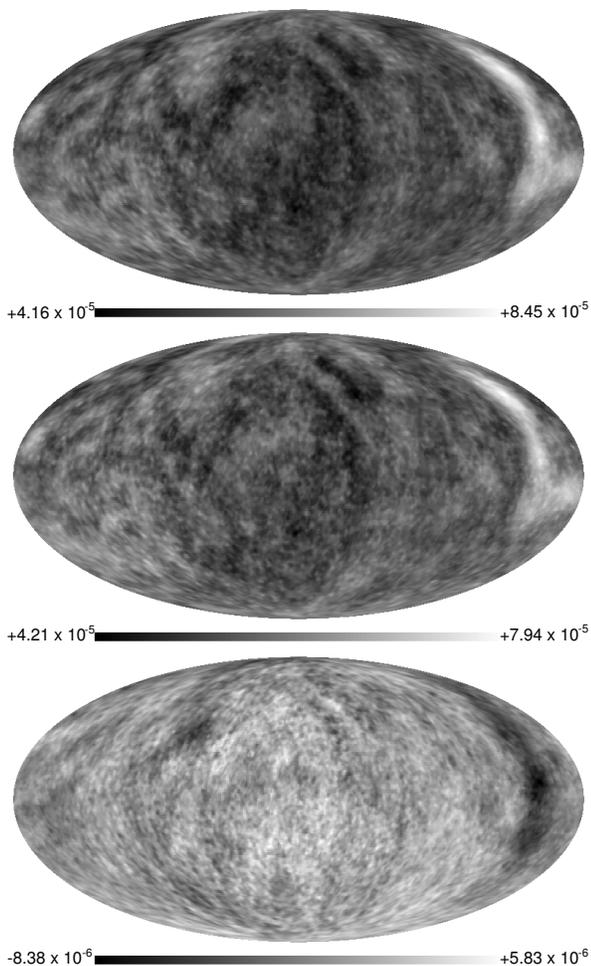


**Рис. 5.** Карты октуполей, построенные в результате применения  $\Sigma_1$ -эстиматора на основе  $C_\ell$ -спектра (вверху), и гармонического разложения сигнала СМВ Planck (внизу). На карту вычислений эстиматора наложена эллиптическая сетка координат.

ся вдоль плоскости Галактики. Два экстремума «тяготеют» к экваториальным полюсам, относительно которых они сдвинуты на расстояние ( $dl = 9^\circ 61', db = 2^\circ 12'$ ), в несколько раз меньшее, чем размер пятна октуполя.

Результат сравнения  $\Sigma_2$ -карт на основе  $D_\ell$ -спектра приведен на рис. 9.  $\Sigma_2$ -карта, как и  $\Sigma_1$ -карта, которая строилась на основе вычисления дисперсия  $D_\ell$ -спектра, выделяет не только самые большие ( $\ell \leq 5$ ) угловые масштабы, но и более мелкие.

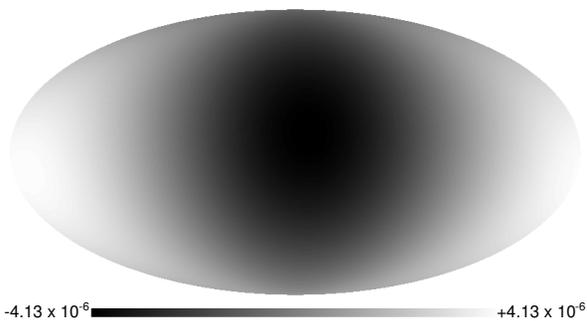
Октуполи как  $\Sigma_2$ -карты, так и разности карт, построенные по данным WMAP и Planck, также привязаны к известным направлениям (рис. 10).



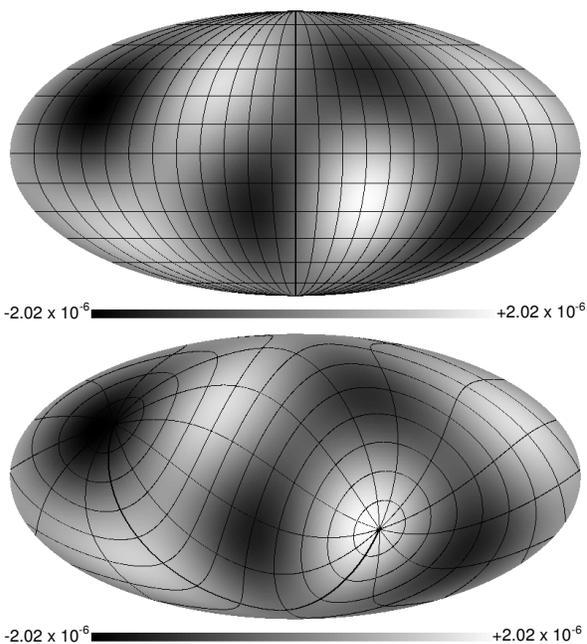
**Рис. 6.** Результаты построения  $\Sigma_1$ -карты для данных WMAP (вверху) и Planck (в центре). На нижнем рисунке показана разность обеих карт. Эстиматор построен на основе  $D_\ell$ -спектра.

Окуполь  $\Sigma_2$ -карты, как и третья гармоника  $\Sigma_1$ -карты на основе  $D_\ell$ -спектра, привязан к двум системам координат: галактической и эклиптической. Причем разность между экваториальными полюсами и ближайшим экстремумами меньше, чем в случае  $\Sigma_1$ -карты: ( $dl = -4^\circ 72$ ,  $db = -3^\circ 24$ ). Гармоника  $\ell = 3$  разности карт коррелирует (соответствующий коэффициент равен  $-0.86$ ) с картой  $\Sigma_1$ -эстиматора на основе  $C_\ell$ -спектра (рис. 5).

На рис. 11 приведены  $P$ -карты, построенные по данным WMAP 9 и Planck, а также их разность. На рис. 12 показаны диполь и квадруполь  $P$ -карты, рассчитанной по данным Planck. Важно отметить, что пара горячих, как и пара холодных пятен, расположена на одном эклиптическом меридиане: эклиптическая долгота максимумов соответственно  $\lambda = 17^\circ 65$  и  $197^\circ 65$  и широта  $\beta = 11^\circ 22$ , а минимумов —  $\lambda = 107^\circ 54$  и  $287^\circ 65$  на широте  $\beta = 0^\circ 09$ .



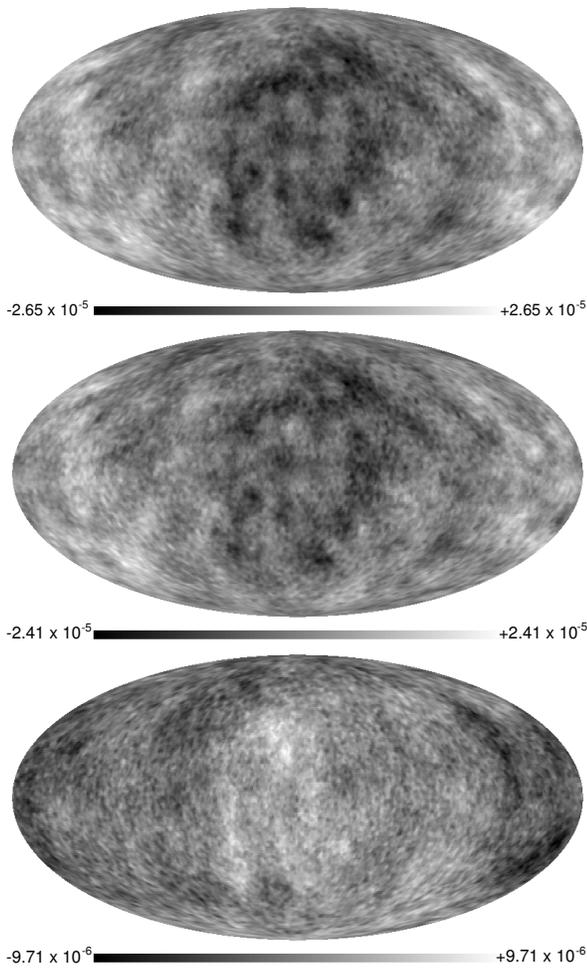
**Рис. 7.** Положение минимума диполя карты, построенной с применением эстиматора на основе  $D_\ell$ -спектра. Галактические координаты минимума  $(l, b) = (351^\circ 94, 9^\circ 83)$ .



**Рис. 8.** Положение пятен октуполя  $\Sigma_1$ -карты, построенной с помощью эстиматора на основе  $D_\ell$ -спектра мощности. На верхнем рисунке показана галактическая система координат, на нижнем рисунке — экваториальная.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

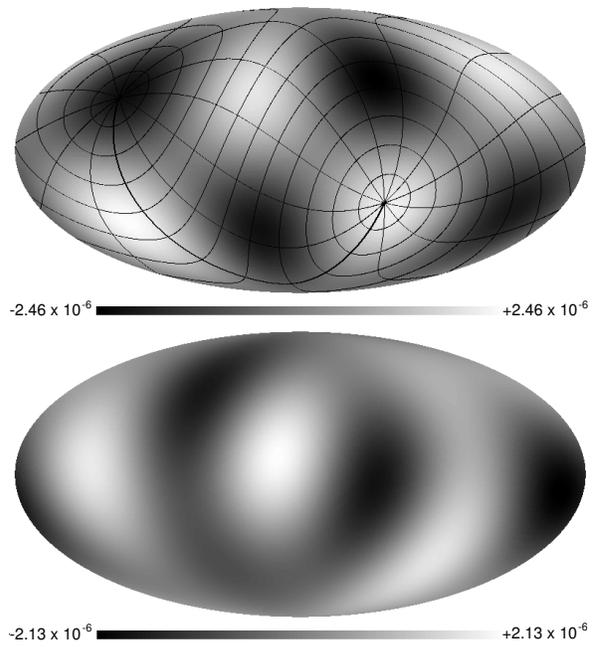
Результат применения эстиматоров свидетельствует о существовании статистической анизотропии, проявляющейся в низких мультиполях. Карта CMB SMICA, восстановленная из многочастотных данных Planck, имеет те же особенности, что и данные микроволнового фона из архива WMAP [36]. В результате применения эстиматоров, построенных на минимизации вариации спектра мощности, обнаруживаются меньшие по относительной амплитуде различия (менее 15%) для данных WMAP девятого года и Planck, чем у эстиматора, построенного на основе параметра четности, дающего



**Рис. 9.** Результаты построения  $\Sigma_2$ -карты для данных WMAP (вверху), Planck (в центре). На нижнем рисунке показана разность обеих карт. Эстиматор построен на основе  $D_\ell$ -спектра.

относительную разность по минимальному и максимальному значениям порядка 40% для WMAP 9 и Planck.

Исследование карт, построенных с использованием предложенных эстиматоров, позволяет локализовать основные направления, связанные с нарушением статистической изотропии. Преобладающие направления привязаны к эклиптическим полюсам и, как в случае  $P$ -карты, к эклиптическим меридианам. Кроме того, эстиматоры с  $D_\ell$ -основанием, применяемые для построения  $\Sigma_1$ -карты (рис. 8) и  $\Sigma_2$ -карты (рис. 10), выделяют в данных СМВ и галактическую систему координат, и экваториальную. По-видимому, октуполь СМВ также привязан к эклиптической системе, и его пятна являются областями деления сферы, где разброс спектра мощности экстремальный. Заметим, что найденная оценка направления асимметрии в распределении мощности анизотропии в недавней

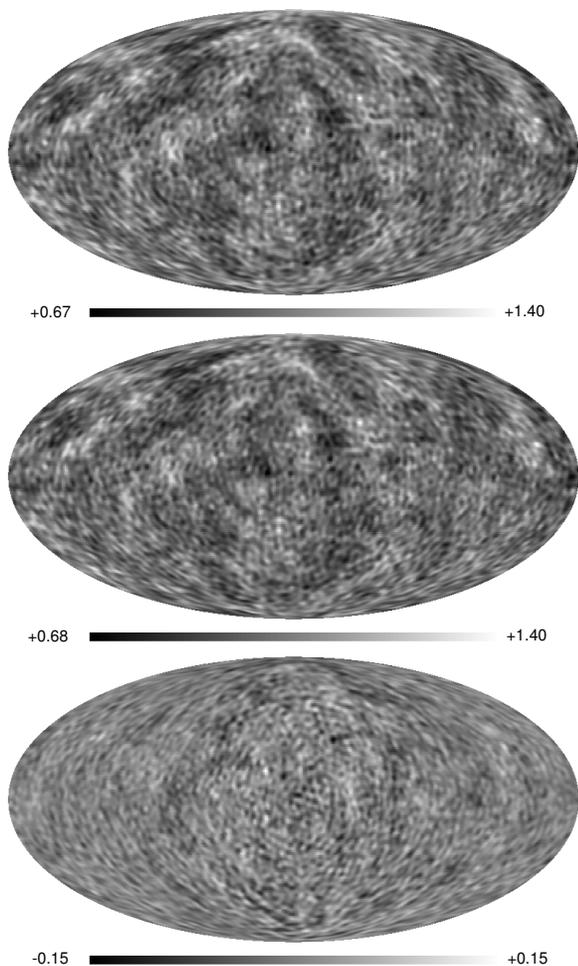


**Рис. 10.** Октуполь  $\Sigma_2$ -карты по данным Planck (сверху) и октуполь разности  $\Sigma_2$ -карт (снизу), построенных по данным Planck и WMAP 9. На  $\Sigma_2$ -карту нанесена экваториальная сетка координат. Эстиматор построен на основе  $D_\ell$ -спектра.

работе [58] по локальной дисперсии карты СМВ указывает на направление  $(l, b) = (212^\circ, -13^\circ)$ . Отметим, что это направление попадает на переход от холодного к горячему пятну на южной полусфере октуполя карты СМВ. И, по-видимому, характеризует октупольную анизотропию.

Следует отметить, что как октуполь СМВ, так и квадруполь и октуполи эстиматоров 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, указывает на воздействие микроволнового излучения Земли через далекие лепестки диаграмма направленности антенны Planck. Кроме того, выводы о локальной природе статистической анизотропии, включая 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 [59].

С учетом привязки статистически анизотропных свойств к выделенным системам координат, связанных с локальными источниками излучения, можно сказать, что при объяснении свойств низких

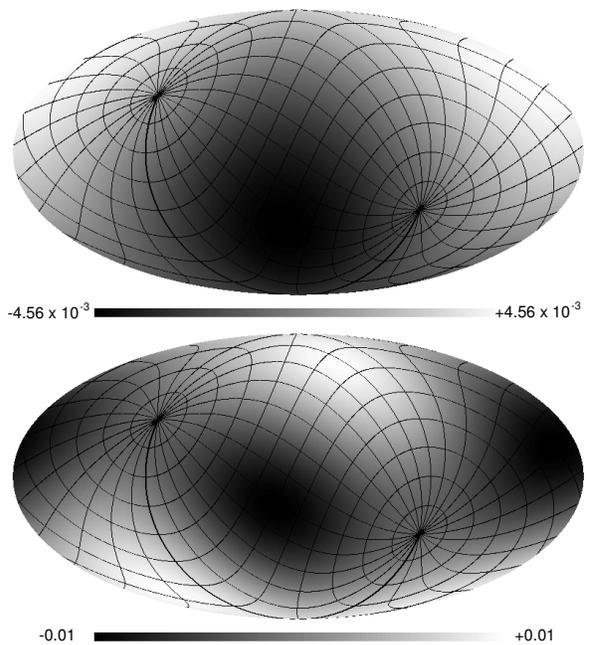


**Рис. 11.** Результаты построения  $P$ -карты (анизотропии четности/нечетности спектра мощности) для данных WMAP (вверху), Planck (в центре). На нижнем рисунке показана разность обеих карт.

мультиполей для части проблем не требуется привлечения теории сложной инфляции, но требуется локализация областей генерирования микроволнового излучения в местном окружении.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою признательность NASA за возможность использования архива (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные архива карт WMAP, и ESA — за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. В работе использован пакет GLESP [52, 60, 61] для анализа протяженного излучения на сфере. Исследования по данной теме были поддержаны грантом РФФИ № 13-02-00027.



**Рис. 12.** Диполь (вверху) и квадруполь (внизу)  $P$ -карты (анизотропии четности/нечетности спектра мощности), построенные в результате применения  $P$ -эстиматора к данным Planck. На карты наложена сетка эклиптической системы координат.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), arXiv:1303.5062.
2. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), arXiv:1303.5083.
3. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, arXiv:1311.4562.
4. L. Santos, P. Cabella, T. Villela, et al., arXiv:1311.0714.
5. H. K. Eriksen, F. K. Hansen, A. J. Banday, et al., *Astrophys. J.* **605**, 14 (2004).
6. A. Mariano and L. Perivolaropoulos, *Phys. Rev. D* **87**, 043511 (2013).
7. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, *Phys. Rev. D* **68**, 123523 (2003).
8. K. Land and J. Magueijo, *Phys. Rev. L* **95**, 1301 (2005).
9. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, and L. Cayon, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356**, 29 (2005).
10. M. Cruz, N. Turok, P. Vielva, et al., *Science* **318**, 1612 (2007).
11. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 101 (2010).
12. J. Kim and P. Naselsky, *Astrophys. J.* **714**, L265 (2010).
13. M. Hansen, A. M. Frejsel, J. Kim, et al., *Phys. Rev. D* **83**, 10350 (2011).
14. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 17 (2011).
15. A. Gruppuso and C. Burigana, *J. Cosmology Astropart. Phys.* **08**, 004 (2009).
16. O. V. Verkhodanov, *Phys. Usp.* **55**, (2012).

17. T. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., *Astrophys. J.* **629**, L1 (2005).
18. M. Demiański and A. Doroshkevich, *Phys. Rev. D* **75**, 123517 (2007).
19. A. Mack, T. Kahniashvili, and A. Kosowsky, *Phys. Rev. D* **65**, 123004 (2002).
20. P. D. Naselsky, L.-Y. Chiang, P. Olesen, and O. V. Verkhodanov, *Astrophys. J.* **615**, 45 (2004).
21. T. Kahniashvili and B. Ratra, *Phys. Rev. D* **71**, 103006 (2005).
22. M. Libanov, S. Mironov, and V. Rubakov, *Phys. Rev. D* **84**, 083502 (2011).
23. S. R. Ramazanov and G. I. Rubtsov, *J. Cosmology Astropart. Phys.* **05**, 033 (2012).
24. H. Liu, A. M. Frejsel, and P. Naselsky, *J. Cosmology Astropart. Phys.* **07**, 032 (2013).
25. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, *Astrophys. J.* **599**, L53 (2003).
26. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **349** 695, (2004).
27. L. La Porta, C. Burigana, W. Reich, and P. Reich, *Astron. and Astrophys.* **479**, 641 (2008).
28. O. V. Verkhodanov and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 1 (2012).
29. O. V. Verkhodanov, T. V. Keshelava, and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 245 (2012).
30. M. Hansen, W. Zhao, A. M. Frejsel, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **426**, 57 (2012).
31. J. M. Diego, M. Cruz, J. González-Nuevo, et al., arXiv: 0901.4344 (2009).
32. V. Dikarev, O. Preuss, S. Solanki, et al., *Astrophys. J.* **705**, 670 (2009).
33. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **64**, 263 (2009).
34. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **65**, 390 (2010).
35. V. S. Berkutov, Ya. V. Naiden, and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 87 (2010).
36. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 345 (2011).
37. M. Hansen, J. Kim, A. M. Frejsel, et al., *J. Cosmology Astropart. Phys.* **10**, 059 (2012).
38. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, *Astrophysical Bulletin* **63**, 216 (2008).
39. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *Int. J. Modern Phys. D* **17**, 179 (2008).
40. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 203 (2007).
41. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418**, 505 (2011).
42. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, *Phys. Rev. D* **83**, 043002 (2011).
43. A. Kashlinsky, F. Atrio-Barandela, H. Ebeling, et al., *Astrophys. J.* **712**, 81 (2010).
44. F. Atrio-Barandela, A. Kashlinsky, H. Ebeling, et al., *Astrophys. J.* **719**, 77 (2010).
45. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **66**, 183 (2011).
46. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), arXiv:1303.5090.
47. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367**, 79 (2006).
48. A. Rakic and D. J. Schwarz, *Phys. Rev. D* **75**, 103002 (2007).
49. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S. V. Karpov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 238 (2010).
50. Ja. Kim and P. Naselsky, *Phys. Rev. D* **82**, 063002 (2010).
51. Ja. Kim and P. Naselsky, *Astrophys. J.* **739**, 79 (2011).
52. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
53. T. Risbo, *J. Geodesy* **70**, 383 (1996).
54. K. Land and J. Magueijo, *Phys. Rev. D* **72**, 101302 (2005).
55. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., arXiv:1212.5225.
56. M. Su, T. R. Slatyer, and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **724**, 1044 (2010).
57. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **554**, A139 (2013).
58. Y. Akrami, Y. Fantaye, A. Shafieloo, et al., arXiv:1402.0870.
59. O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 330 (2014).
60. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **14**, 275 (2003).
61. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **20**, 1053 (2011).

## Two-Dimensional Spectral Estimators of Statistical Anisotropy and Search for the Isolated Directions in Planck Mission Data

Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov

We describe a method for the analysis of homogeneity of the microwave background maps based on the behavior of the angular power spectrum  $C(\ell)$  and parity parameter  $P$ . The estimator is built using the dispersion variation of the power spectrum of the background signal hemisphere and allows to visualize the statistical anisotropy as a new map which characterizes the homogeneity/heterogeneity of the background in the second order. Using the proposed method, we made the data analysis of the WMAP mission nine-year observations and the first Planck mission data release for the map with the resolution of  $\ell \leq 100$ . As a result, we have detected the asymmetry of the microwave background signal map associated with the ecliptic coordinate system both in the plane of the ecliptic and in the orthogonal direction. We also discuss the problems of generating the anisotropic signal.

Keywords: *cosmic background radiation—methods: data analysis*