

УДК 524.827-14(084)

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА ПО ДАННЫМ WMAP И КАТАЛОГОВ 2MRS И SDSS НА РАЗНЫХ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЯХ

© 2013 Я. В. Найден*, О. В. Верходанов**

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 4 июня 2013 года; принята в печать 26 июня 2013 года

Рассчитаны карты мозаичных корреляций данных микроволнового фона ILC WMAP и положений инфракрасных и оптических внегалактических объектов по данным каталога 2MRS и обзора SDSS соответственно. С помощью гистограмм значений сигналов в пикселях и угловых спектров мощности исследованы статистические свойства этих карт. Построены эволюционные, зависящие от z , спектры мощности корреляционных карт. Показано, что существуют выделенные масштабы (2° – 3°) корреляций на разных красных смещениях ($z = 1$ – 2), которые могут соответствовать размеру максимальной ячейки неоднородности (60–90 Мпк) в разные космологические эпохи.

Ключевые слова: *реликтовое излучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление полных обзоров неба с измеренной яркостью протяженного излучения, особенно в микроволновом диапазоне [1–6] в космических экспериментах по изучению реликтового фона (Cosmic Microwave Background — CMB), и обзоров внегалактических объектов с полными по плотностям потока каталогами источников излучения [7–9] позволило исследовать особенности влияния крупномасштабной структуры на флуктуации микроволнового фона, наблюдаемые в результате ряда эффектов на различных угловых масштабах. Наиболее существенным образом крупномасштабная структура проявляется в эффекте Сюняева–Зельдовича [10, 11], интегральном эффекте Сакса–Вольфа (ISW) [12–14] и при гравитационном линзировании [15].

Эффект Сакса–Вольфа, обусловленный местным сверхскоплением, привлекается также для решения одной из актуальных проблем: аномалии в распределении сигнала CMB — так называемой “Оси Зла” [13, 16]. Ось, определяемая положением экстремумов двух низких гармоник (квадруполь и октополь), располагающихся вдоль одной оси [17, 18], является одной из основных тем обсуждения в большом числе работ, посвященных систематике [19–21], методам разделения компонент [20, 22], эффектам в Солнечной системе [23]

или движению самой Солнечной системы [19], а также другим механизмам [24, 25]. Этот интерес связан, в частности, и с тем, что существование такого эффекта является признаком статистической анизотропии. И хотя значимость этого эффекта в данных миссии Planck уменьшена [26], проблема, тем не менее, остается. В этом плане подход, предложенный в работе [13], является, с нашей точки зрения, интересным способом устранить проблему “Оси Зла.”

Отметим еще один важный момент. Кроме первичных возмущений плотности, формирующих низкочастотные флуктуации CMB (так называемая первичная анизотропия, дающая существенный вклад в гармоники с номерами $2 < \ell < 50$), существует и вторичная анизотропия, проявляющаяся благодаря упомянутым выше эффектам (Сакса–Вольфа [27], Сюняева–Зельдовича [28, 29]) и гравитационному линзированию [30], также связанная с распределением материи во Вселенной. Кроме того, на масштабах скоплений наблюдаются также радиогало скоплений и гигантские радиогалактики, вносящие дополнительные искажения микроволнового фонового излучения [31–34]. Существенным моментом может оказаться и влияние на статистику сигнала неразрешенных (или слабо-разрешенных) внегалактических и галактических радиоисточников.

С учетом того что разные эффекты вторичной анизотропии являются значимыми на разных угловых масштабах (в плоском сферическом описании) и на разных красных смещениях (в простран-

*E-mail: yarnaid@mail.ru

**E-mail: vo@sao.ru

ственном представлении), представляет несомненный интерес оценка вклада (и уровня значимости) этих эффектов на спектр мощности C_ℓ флуктуаций СМВ. Соответствующую связь можно описать передаточной функцией $\Phi(z, \ell)$, которую, в частности, представляет корреляционная функция двух распределений (фона и положения внегалактических источников) $K(\mathbf{n}, \omega, z, \ell)$, где \mathbf{n} — направление на небе, ω — размер окна корреляции, z — красное смещение из диапазона $[z; z + \Delta z]$, в котором выбраны объекты каталогов, ℓ — мультиполь, для которого построена карта СМВ. Такой подход по исследованию функции $K(\mathbf{n}, \omega, z, \ell)$ покажет не только вклад вторичной анизотропии на разных гармониках в распределении фона, но и выявит диапазоны красных смещений, где возможно максимальное участие распределения материи в анизотропии СМВ в близкие эпохи. Другими словами, корреляционный метод позволяет исследовать подинтегральную функцию, используемую при описании наблюдаемого углового спектра мощности СМВ:

$$C_\ell = \int q_k^2 W_\ell^2(k\eta_0) \frac{dk}{k},$$

где $W_\ell(x)$ — передаточная функция, связывающая пространственный трехмерный спектр возмущений и двумерный спектр анизотропии СМВ и в которой интегрирована $\Phi(z, \ell)$, q_k — Фурье-амплитуда q -поля первичных возмущений на пространственной частоте k , η_0 — текущий момент времени.

В данной работе мы продолжаем (см. [35, 36]) исследование корреляций распределения внегалактических инфракрасных и оптических источников с известным красным смещением с картой микроволнового фона. В качестве карты СМВ мы используем карту миссии WMAP, сигнал которой представляет внутреннюю линейную комбинацию данных (Internal Linear Combination — ILC) наблюдательных частотных полос космического эксперимента WMAP [2]. Как уже было показано в работе [35], в мозаичных картах корреляций СМВ и объектов каталога 2MASX [37] выделяется несколько гармоник, мощность которых выходит за рамки стандартного случайного разброса 1σ для чисто гауссовых флуктуаций СМВ. Одна из таких гармоник — четвертая — в корреляциях данных 2MASX с ILC показывает сигнал, “знающий” о галактической системе координат. Это отражается, например, в том, что самые холодные и горячие пятна коррелированного сигнала выстраиваются вдоль Галактической плоскости (Рис. 1). Как было отмечено в работе [35], в Южном галактическом полушарии эта карта подобна карте, построенной [38] для сигнала интегрального эффекта Сакса–Вольфа по тем же данным 2MASX и

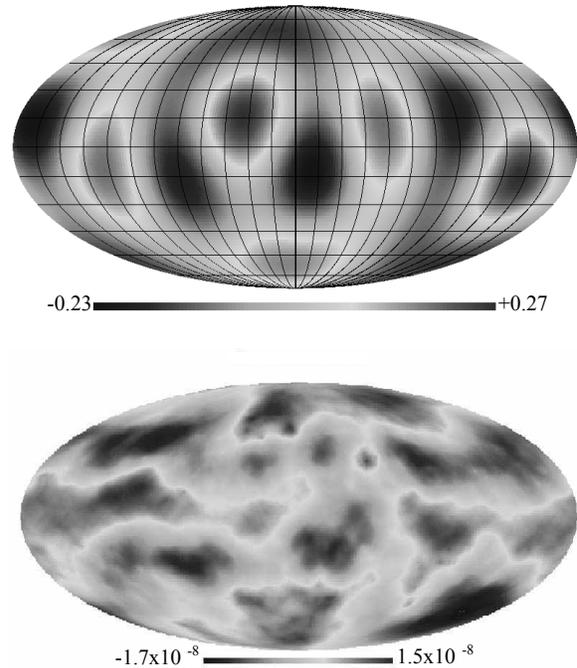


Рис. 1. Карта 4-го мультиполя карты корреляций положения источников 2MASS и сигнала ILC WMAP (вверху) и эффекта Сакса–Вольфа из работы [38] (внизу). По данным работы [35].

WMAP ILC (см. Рис. 1). Параллельность оцененного сигнала ISW-эффекта и плоскости Галактики также может быть вызвана эффектом систематики: корреляционными свойствами (неполнотой информации в 2MASX и выделенностью плоскости Галактики в ILC WMAP), которые мы обнаружили в проведенном исследовании.

Отметим также несколько работ, посвященных анализу наблюдения крупномасштабной структуры в данных СМВ. В работе [39] методом наложения друг на друга (процедура *stacking*) разных областей карты СМВ в областях войдов обзора SDSS (DR7) было получено холодное пятно, промоделированное и интерпретированное в рамках интегрального эффекта Сакса–Вольфа. В работе [12] рассчитывались корреляции в гармоническом пространстве карт WMAP СМВ и каталога источников обзора [40], в результате было обнаружено, что найденный уровень корреляций согласуется с космологической моделью Λ CDM. В уже упомянутых выше работах [13, 16] по данным ИК обзора 2MASS и обзора на 1.4 ГГц NVSS [9], а также карты WMAP ILC были получены оценки уровня эффекта ISW. При вычитании оцененного сигнала ISW из данных СМВ авторы изменяли форму квадруполья и октуполья, тем самым закрывая проблемы “Оси Зла.” При анализе данных эксперимента Planck авторы [14] также применяли

Таблица 1. Число объектов SDSS в разных диапазонах красных смещений, отобранных для построения карт

Диапазон z	Число объектов	Диапазон z	Число объектов	Диапазон z	Число объектов
$0.0 \leq z < 0.1$	913407	$2.0 \leq z < 2.1$	5120	$4.0 \leq z < 4.1$	377
$0.1 \leq z < 0.2$	381679	$2.1 \leq z < 2.2$	7781	$4.1 \leq z < 4.2$	267
$0.2 \leq z < 0.3$	113841	$2.2 \leq z < 2.3$	11108	$4.2 \leq z < 4.3$	209
$0.3 \leq z < 0.4$	117943	$2.3 \leq z < 2.4$	10429	$4.3 \leq z < 4.4$	156
$0.4 \leq z < 0.5$	136594	$2.4 \leq z < 2.5$	8452	$4.4 \leq z < 4.5$	113
$0.5 \leq z < 0.6$	176965	$2.5 \leq z < 2.6$	6650	$4.5 \leq z < 4.6$	102
$0.6 \leq z < 0.7$	83894	$2.6 \leq z < 2.7$	5254	$4.6 \leq z < 4.7$	93
$0.7 \leq z < 0.8$	25385	$2.7 \leq z < 2.8$	3787	$4.7 \leq z < 4.8$	83
$0.8 \leq z < 0.9$	9692	$2.8 \leq z < 2.9$	3510	$4.8 \leq z < 4.9$	70
$0.9 \leq z < 1.0$	6481	$2.9 \leq z < 3.0$	3458	$4.9 \leq z < 5.0$	53
$1.0 \leq z < 1.1$	6062	$3.0 \leq z < 3.1$	3237	$5.0 \leq z < 5.1$	40
$1.1 \leq z < 1.2$	5796	$3.1 \leq z < 3.2$	2893	$5.1 \leq z < 5.2$	33
$1.2 \leq z < 1.3$	6239	$3.2 \leq z < 3.3$	2240	$5.2 \leq z < 5.3$	35
$1.3 \leq z < 1.4$	5939	$3.3 \leq z < 3.4$	1526	$5.3 \leq z < 5.4$	17
$1.4 \leq z < 1.5$	6133	$3.4 \leq z < 3.5$	766	$5.4 \leq z < 5.5$	16
$1.5 \leq z < 1.6$	7416	$3.5 \leq z < 3.6$	845	$5.5 \leq z < 5.6$	22
$1.6 \leq z < 1.7$	7071	$3.6 \leq z < 3.7$	965	$5.6 \leq z < 5.7$	23
$1.7 \leq z < 1.8$	6345	$3.7 \leq z < 3.8$	908	$5.7 \leq z < 5.8$	50
$1.8 \leq z < 1.9$	5846	$3.8 \leq z < 3.9$	687	$5.8 \leq z < 5.9$	26
$1.9 \leq z < 2.0$	5360	$3.9 \leq z < 4.0$	487	$5.9 \leq z < 6.0$	102

процедуры stacking и определили существование эффекта для данных CMB, NVSS и SDSS, подтвердив космологическую модель с темной энергией Λ CDM.

Большое количество работ связано с наблюдениями эффекта Сюняева–Зельдовича [10, 11, 41], который вносит свой вклад в формирование вторичной анизотропии на разных ℓ и z . Полный список скоплений с наблюдательным подтверждением эффекта Сюняева–Зельдовича еще не создан, но уже понятно, что этот сигнал влияет на результирующий спектр мощности CMB. Кроме того, кинематический эффект Сюняева–Зельдовича позволяет исследовать крупномасштабные движения материи в разных диапазонах красных смещений [42–45].

В данной работе мы исследуем мозаичные карты корреляций сигнала ILC WMAP и каталога внегалактических источников 2MRS [46] с измеренными красными смещениями, а также каталогов галактик

и квазаров SDSS [8] из разных диапазонов z . Данные каталоги мы отобрали в связи с наиболее полным покрытием неба и большим списком галактик с измеренным красным смещением. Корреляционные карты рассчитываются для разных гармоник ℓ , что дает возможность оценить поведение функции $K(\mathbf{n}, \omega, z, \ell)$. На втором этапе (в следующей статье) мы проведем сравнение с сигналом CMB, полученным по результатам миссии Planck.

2. МОЗАИЧНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

2.1. Данные

Для поиска возможных корреляций между картами фонового излучения и положением внегалактических объектов мы использовали данные разных обзоров, краткое описание которых приводим ниже.

2.1.1. Карта ILC WMAP

Как уже упоминалось выше, в качестве карты СМВ мы использовали карту распределения анизотропии микроволнового фона, восстановленную из многочастотных наблюдений методом внутренней линейной комбинации фоновых компонент семилетнего релиза данных [4]. Для построения этой карты использовались данные миссии WMAP в пяти наблюдательных полосах: 23 ГГц (полоса *K*), 33 ГГц (полоса *Ka*), 41 ГГц (полоса *Q*), 61 ГГц (полоса *V*) и 94 ГГц (полоса *W*). Карта ILC содержит информацию о распределении микроволнового фона для не очень высоких гармоник ($\ell \leq 100$). При анализе карты ILC для разложения по сферическим гармоникам мы использовали пакет GLESP¹ [47], где в соответствии с разложением вариаций температуры по мультиполям (сферическим гармоникам) имеем:

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

где сферическая гармоника

$$Y_{\ell m}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2\ell + 1)(\ell - m)!}{4\pi(\ell + m)!}} P_{\ell}^m(x) e^{im\phi},$$

$x = \cos \theta$, $P_{\ell}^m(x)$ — присоединенные полиномы Лежандра, ℓ и m — номер мультиполя и его моды соответственно. Угловой спектр мощности карты на сфере определяется как

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

2.1.2. Каталог 2MRS

Каталог всего неба 2MASS (2 Micron All-Sky Survey) [7] получен в результате обзора, проведенного на 1.3-м телескопах обсерваторий Mt. Hopkins (Arizona) и Cerro Tololo (Chile). Он включает примерно 4.7×10^8 точечных объектов (PSC) и каталог протяженных источников XSC (или 2MASX), содержащий приблизительно 1.6×10^6 объектов, преимущественно галактик (около 90%), в трех цветовых полосах: *J* (ярче 15^m), *H* и *Ks* (ярче 13^m) [37]. Примерно 2–5% объектов XSC являются областями путаницы из-за двойных звезд или артефактов (например, содержащих часть излучения ярких звезд). Излучение на длинах волн ближнего инфракрасного диапазона чувствительно к старому звездному населению, которое доминирует в видимых массах

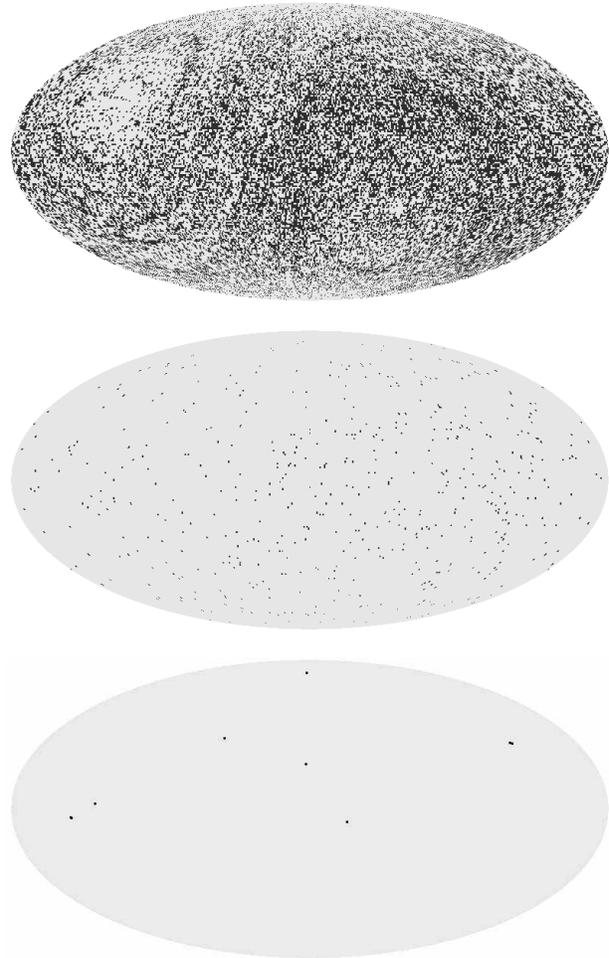


Рис. 2. Положение объектов каталога 2MRS на сфере в галактических координатах. На верхнем рисунке объекты из диапазонов $0 < z < 0.1$, на среднем — из диапазона $0.1 \leq z < 0.2$, на нижнем — $0.2 \leq z < 0.3$.

эллиптических галактик. Таким образом, каталог 2MASS является хорошим инструментом для исследования распределения материи в близкой Вселенной. Авторы [46] подготовили выборку, содержащую 44 599 галактик обзора 2MASS в диапазоне величин $Ks \leq 11^m$ и галактических широт $|b| \geq 5^\circ$ (и $|b| \geq 8^\circ$ по направлению к галактическому балджу). Проект обзора красных смещений галактик 2MASS (2MASS Redshift Survey — 2MRS) продолжался 10 лет и позволил построить трехмерное распределение галактик ближней Вселенной. Положение объектов 2MRS из разных диапазонов красных смещений (34 919 шт. из $0 < z < 0.1$, 540 шт. из $0.1 \leq z < 0.2$ и 7 шт. из $0.2 \leq z < 0.3$) на небесной сфере показано на Рис. 2.

¹<http://www.glesp.nbi.dk>

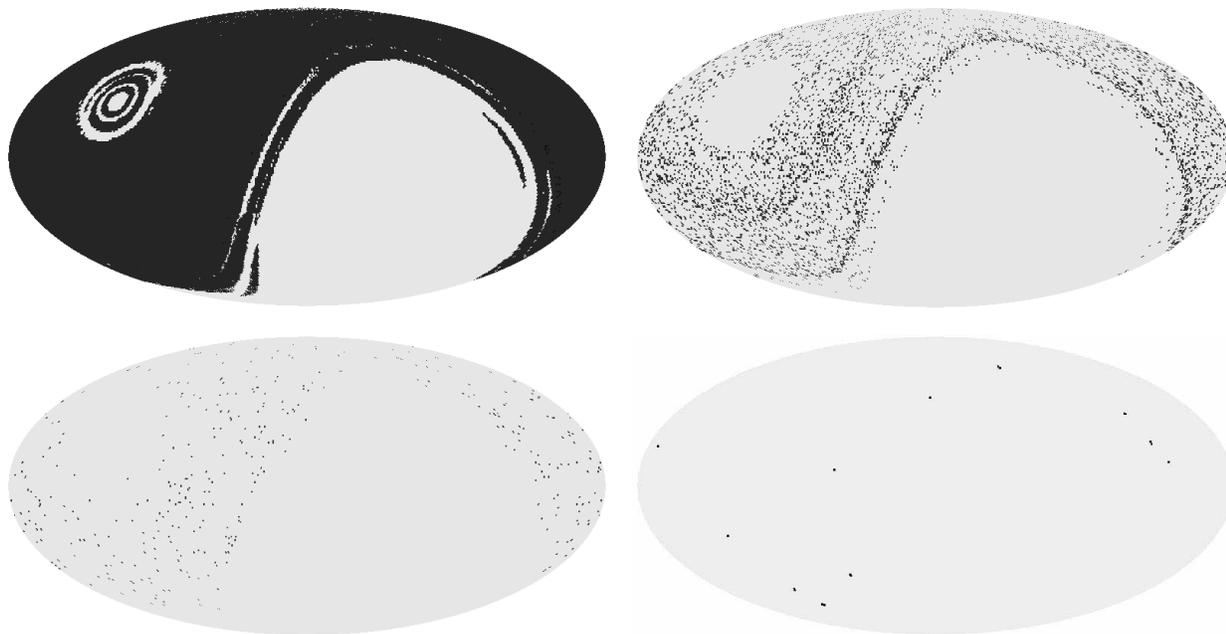


Рис. 3. Примеры карт с положением объектов каталога SDSS на сфере в галактических координатах. Слева направо сверху вниз: объекты из диапазонов $0 \leq z < 0.1$, $2.0 \leq z < 2.1$, $4.0 \leq z < 4.1$, $6.0 \leq z < 6.1$.

2.1.3. Каталог SDSS

Слоановский обзор неба² [8] (The Sloan Digital Sky Survey — SDSS) проводится на 2.5-м оптическом телескопе в Apache Point Observatory, New Mexico, оснащенный двумя специализированными инструментами: 120-мегапиксельной камерой с полем зрения 1.5° и парой спектрографов с оптической фиберной системой для измерения спектров. В результате обзора подготовлены многоцветные изображения более чем четверти неба и трехмерные карты, содержащие приблизительно 1.4×10^6 галактик и около 2.3×10^5 квазаров.

Для нашего исследования были отобраны объекты как с измеренными спектроскопическими красными смещениями, так и с фотометрическими оценками z (таблицы SpecObj и PhotoObj на сайте SDSS). Положение объектов SDSS из разных диапазонов красных смещений на небесной сфере показано на Рис. 3 (см. также Таблицу 1).³

2.2. Процедура корреляции

Для построения карты корреляций мы использовали подход, предложенный в работах [48–50] и реализованный в виде процедуры во второй версии пакета GLESP [51] (утилита difmap). Метод

²<http://www.sdss.org>

³При построении выборки из первого SpecObj исключались объекты QA, повторы и объекты таблицы Sky.

позволяет обнаружить корреляции на исследуемых площадках определенного углового размера для двух карт. В этом методе каждому пикселу с номером p , стягивающему телесный угол Ξ_p , ставится в соответствие величина коэффициента кросс-корреляции данных обеих карт на заданной площадке. Таким образом, для двух сигналов T и S строится карта корреляций, у которой каждый пиксел p ($p = 1, 2, \dots, N_0$, и N_0 — полное число пикселов на сфере) с углом Ξ_p , вычисляемый для карт на сфере с исходным разрешением, определяемым ℓ_{\max} , есть

$$K(\Xi_p | \ell_{\max}) = \frac{1}{N} \frac{1}{\sigma_{T_p} \sigma_{S_p}} \times \sum_{p_{ij} \in \Xi_p} \left(T(\theta_i, \phi_j) - \overline{T(\Xi_p)} \right) \left(S(\theta_i, \phi_j) - \overline{S(\Xi_p)} \right).$$

Здесь $T(\theta_i, \phi_j)$ — величина сигнала T в пикселе с координатами (θ_i, ϕ_j) для исходного разрешения пикселизации сферы; $S(\theta_i, \phi_j)$ — величина второго сигнала на такой же площадке (в нашем случае распределение числа объектов); $\overline{T(\Xi_p)}$ и $\overline{S(\Xi_p)}$ — средние значения в площадке, стягиваемой углом Ξ_p , полученные по данным карт с более высоким разрешением, задаваемым ℓ_{\max} ; σ_{T_p} и σ_{S_p} — соответствующие статистические стандарты на этой площадке.

Перед процедурой корреляции мы сглаживали карты гауссианой с полушириной $\theta = 3, 5$ и 10° в

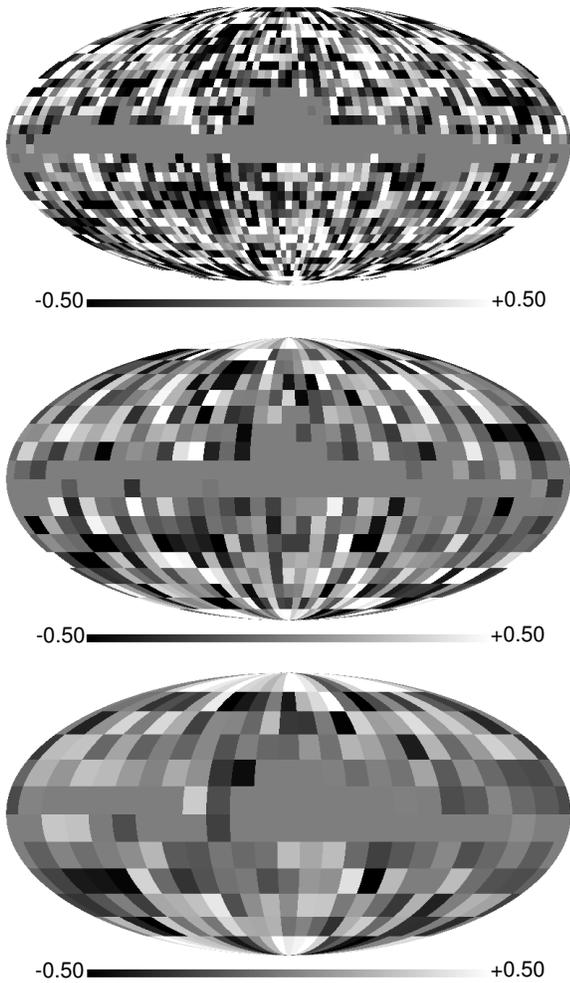


Рис. 4. Примеры карт мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога 2MRS (объекты из диапазона $0 \leq z < 0.1$) для различных окон корреляции (сверху вниз: $300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах. Область Галактики экранирована маской.

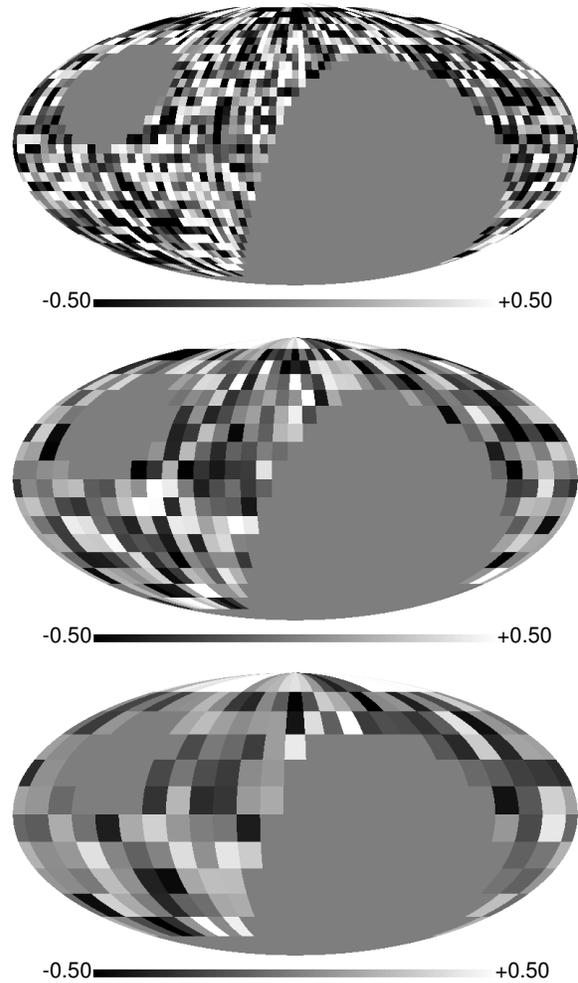


Рис. 5. Примеры карт мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога SDSS (объекты из диапазона $1 \leq z < 1.1$) для различных окон (сверху вниз: $300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах. Зоны отсутствия наблюдений в обзоре SDSS экранированы маской.

гармоническом пространстве для приведения их к одному разрешению. Кроме того, на карты в области отсутствующих данных накладывалась маска.

2.3. Карты корреляций и их спектры

В результате описанной процедуры были подготовлены карты, отражающие корреляционное поведение на сфере исследуемых сигналов и СМВ на различных угловых масштабах. Для анализа использовались карты с сигналом, сглаженным гауссовой диаграммой с полушириной $\theta = 10^\circ$.

На Рис. 4 и 5 показаны соответственно мозаичные карты корреляций для данных 2MRS и SDSS с окном корреляции размером $w = 300'$ (максимальный мультиполь $\ell_{\max} = 18$), $600'$ ($\ell_{\max} = 9$) и

$900'$ ($\ell_{\max} = 5$). Зоны отсутствия наблюдений в обзоре SDSS экранированы маской.

На Рис. 6 и 7 показаны примеры гистограмм пикселей мозаичных карт для каталогов 2MRS и SDSS на различных угловых масштабах. Серым фоном отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса значений гистограмм соответствующих корреляционных карт с гауссовым случайным полем в Λ CDM-космологической модели. Как видно из приведенных рисунков, имеются выбросы в статистике корреляционных коэффициентов, нарушающие ожидаемое распределение в рамках гауссова поля. Эти отскоки связаны с существованием областей повышенной корреляции/антикорреляции исследуемых сигналов.

На Рис. 8 и 9 показаны примеры угловых спектров мощности C_ℓ мозаичных карт для каталогов

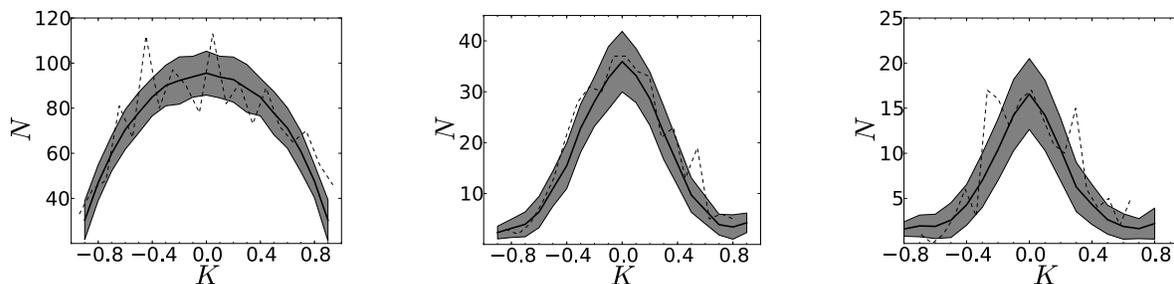


Рис. 6. Примеры гистограмм распределения значения пикселей K карты корреляций данных 2MRS (плотности потока в фильтре J_s , объекты из диапазона $0 \leq z < 0.1$) и ILC WMAP (данные показаны пунктирной линией) для различных корреляционных окон (слева направо: $300'$, $600'$, $900'$). Серым фоном отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных 2MRS с картой флуктуаций фона, ожидаемые для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

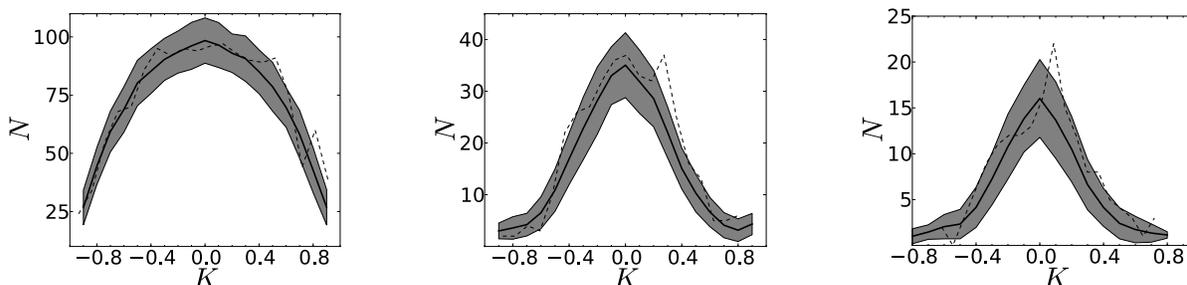


Рис. 7. Примеры гистограмм распределения значения пикселей K карты корреляций данных SDSS (плотности потока в фильтре r' , объекты из диапазона $1 \leq z < 1.1$) и ILC WMAP (данные показаны пунктирной линией) для различных корреляционных окон (слева направо: $300'$, $600'$, $900'$). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных FSC с картой флуктуаций фона, ожидаемые для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

2MRS и SDSS на различных угловых масштабах. Серым фоном отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса значений C_ℓ соответствующих корреляционных карт с гауссовым случайным полем в Λ CDM-космологической модели.

2.4. Мощные гармоники

Для того, чтобы отследить изменение спектров мощности корреляционных карт в зависимости от z , мы исследовали функцию $K(\mathbf{n}, \omega, z, \ell)$, построенную по данным СМВ и SDSS. Было выбрано несколько гармоник из низкочастотного диапазона: $\ell = 10, 30, 50, 100$, соответствующих масштабам приблизительно $8^\circ, 3^\circ, 2^\circ$ и 1° в рамках углового разрешения карты СМВ WMAP.

На Рис. 10 показаны несколько сечений функции $K(\mathbf{n}, \omega, z, \ell)$ в параметрическом пространстве (z, ℓ) , где $z \in [z; z + \Delta z]$, $\Delta z = 0.1$, ℓ — номер мультиполя исходной карты СМВ, для которого построена отдельная карта микроволнового фона, участвующая в процедуре мозаичной корреляции. Рисунки демонстрируют корреляцию положений галактик с определенными гармониками СМВ.

Среди наиболее сильных гармоник, превосходящих уровень разброса 3σ среди симуляций СМВ сигнала в модели Λ CDM, выделяются гармоники на $z \simeq 0.8$ и $z \simeq 1.9$ для угловых масштабов $2-3^\circ$. Кроме того, для $\ell = 100$ в корреляционных картах на разных масштабах в “эволюционном” спектре возникает пик в районе $z \simeq 5.4$. Это соответствует масштабам примерно 1° .

Важно отметить, что существование выделяющихся пиков в спектре мощности корреляционных карт происходит на фоне искажения распределения корреляционных коэффициентов. Этот факт говорит о согласованности поведения распределения флуктуаций СМВ и определенных масштабов в распределении вещества на заданных красных смещениях.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы рассчитали и исследовали карты мозаичных корреляций между распределением сигнала микроволнового фона ILC WMAP и положениями инфракрасных и оптических внегалактических объектов по данным каталога 2MRS и обзора

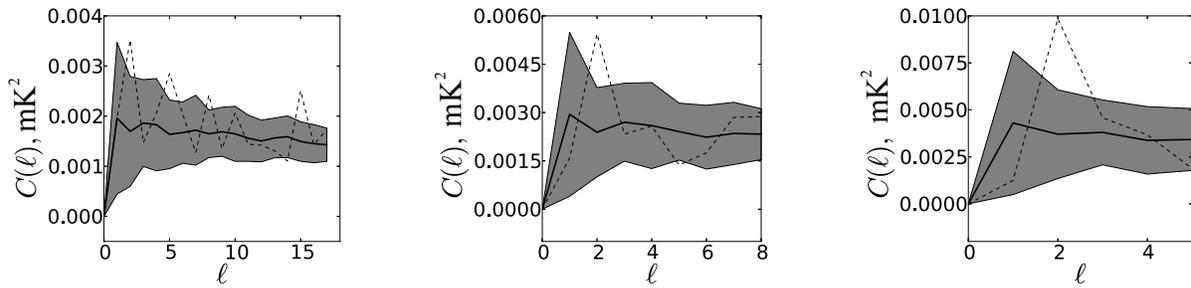


Рис. 8. Примеры угловых спектров мощности карты корреляций данных 2MRS (плотности потока в фильтре J_s , объекты из диапазона $0 \leq z < 0.1$) и ILC WMAP (данные показаны пунктирной линией) для различных корреляционных окон (слева направо: $300'$, $600'$, $900'$). Серым фоном отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных 2MRS с картой флуктуаций фона, ожидаемые для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

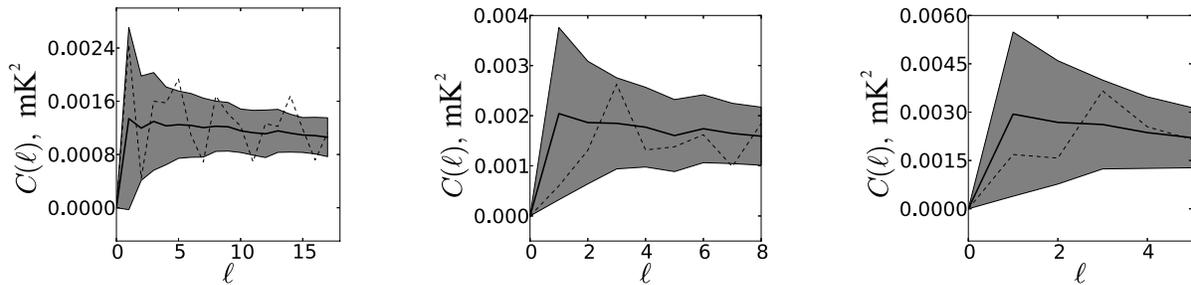


Рис. 9. Примеры угловых спектров мощности карты корреляций данных SDSS (плотности потока в фильтре r' , объекты из диапазона $1 \leq z < 1.1$) и ILC WMAP (данные показаны пунктирной линией) для различных корреляционных окон (слева направо: $300'$, $600'$, $900'$). Серым фоном отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных SDSS с картой флуктуаций фона, ожидаемые для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

SDSS. Карты распределений источников на сфере строились для объектов из различных диапазонов красных смещений. Для мозаичных корреляционных карт мы рассчитали гистограммы распределения величины сигнала в пикселях и угловых спектров мощности, а также исследовали статистические свойства этих карт. Применение карт, построенных для источников из отобранных диапазонов $z + \Delta z$, позволило изучить эволюционные, т.е. зависящие от z , спектры мощности корреляционных карт. Таким образом, предложен метод исследования крупномасштабной структуры, основанный на выделении общих свойств распределения вещества на разных красных смещениях и вторичной анизотропии реликтового излучения. В основе такой корреляции лежат свойства передаточной функции $\Phi(z, \ell)$, связывающей трехмерное распределение материи и двумерное распределение СМВ на сфере и определяемой механизмами появления вторичной анизотропии, среди которых — эффекты Сакса–Вольфа и Сюняева–Зельдовича, гравитационное линзирование, излучение радиогало скоплений, гигантских радиогалактик, а также неразрешенных радиисточников. При этом мы не разделяли эффекты вторичной анизотропии, т.е. не

строили отдельные карты для каждого эффекта, но выделили коррелированные области для определенных ℓ и z : масштабы 2° – 3° на $z = 1$ – 2 для данных SDSS.

Использование каталога 2MRS в проведенном исследовании оказалось не столь эффективным. Как видно из Рис. 2, каталог 2MASS имеет малое число объектов при $z > 0.2$. Тем не менее в распределении пикселей имеются отклонения от ожидаемых для гауссовых возмущений плотности (Рис. 6), что, скорее всего, обусловлено локальным (на близких пространственных масштабах) нарушением гауссовости. Ввиду отсутствия сильных пиков в спектре мощности мозаичных карт корреляций мы не стали исследовать зависимость спектра мощности от красного смещения для корреляционных карт 2MASS. Однако представляет интерес исследование карт для меньшего диапазона z с меньшим шагом Δz и лучшим разрешением в картах СМВ, измеренным в космической миссии Planck, где будет доминировать эффект Сюняева–Зельдовича.

При корреляции с данными SDSS обнаружены диапазоны мультиполей на определенных красных смещениях, в которых имеются сильные пики

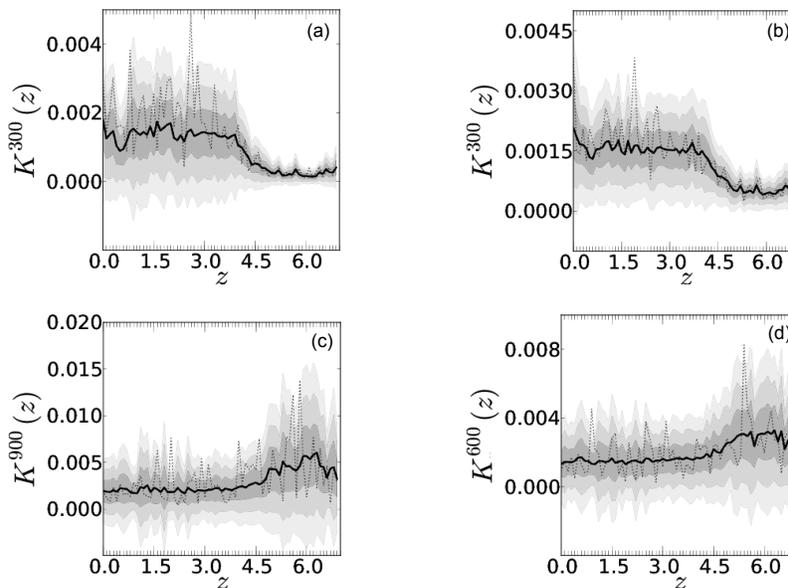


Рис. 10. Примеры угловых спектров мощности для заданных гармоник карты корреляций данных SDSS (плотности потока в фильтре r' , объекты из диапазона $1 \leq z < 1.1$) и ILC WMAP. Слева направо сверху вниз: (a) рисунок “эволюционной” корреляции $K_{\bar{\ell}}(z, \ell)$, где $\bar{\ell} = 4$ — гармоника из корреляционной карты, $\ell = 50$ — гармоника исходной карты CMB, размер окна корреляции выбран $\omega = 300'$, амплитуда сигнала выше уровня 3σ ; (b) корреляция $K_{\bar{\ell}}(z, \ell)$, $\bar{\ell} = 11$, $\ell = 30$, $\omega = 600'$, уровень выше 2σ ; (c) $\bar{\ell} = 3$, $\ell = 100$, $\omega = 900'$, уровень выше 3σ ; (d) $\bar{\ell} = 4$, $\ell = 100$, $\omega = 600'$, уровень выше 3σ . Наблюдаемые пики, выходящие за 2σ -уровень разброса, соответствуют корреляционным масштабам с выделенным пространственным размером на данном красном смещении.

в спектре мощности. Угловые масштабы, соответствующие найденным гармоникам, — примерно 2° – 3° . На $z \sim 0.8$ и $z \sim 1.9$ в космологической модели Λ CDM ($H_0 = 70$ км/с/Мпк, $\Omega_\Lambda = 0.72$, $\Omega_m = 0.28$) линейные размеры являются близкими и составляют $D \sim 60$ – 90 Мпк для данных угловых масштабов. Этот размер мы интерпретируем как размер ячейки неоднородности крупномасштабной структуры на этих z . На больших линейных масштабах наблюдается переход к гауссовому распределению материи и, соответственно, к гладкому поведению спектра мощности (без выделенных пиков) в карте мозаичной корреляции. Наша величина максимальной ячейки неоднородности согласуется с исследованиями [52–54], в которых для анализа применялся метод обобщенных размерностей (фрактальный подход) или построение кросс-корреляционной функции скоплений. Полученный результат находится в согласии с данными моделирования в рамках Λ CDM-космологической модели [55].

Для $z \sim 5.2$ масштабы $\theta \sim 1^\circ$ соответствуют размеру $D \sim 20$ Мпк. Отметим, что момент $z \sim 5$ является концом эпохи реионизации, в результате действия которой флуктуации CMB “замазывались.” Следует сказать, что результат на $z \sim 5.2$ требует дополнительной проверки из-за возможного влияния особенностей анализа данных на

предельном угловом разрешении карты WMAP, а также малости числа галактик на данном z . В следующей работе мы проверим полученные результаты с использованием карт эксперимента Planck, имеющих лучшее разрешение.

Таким образом, предложенный метод корреляции карт позволил выделить на разных z области наибольшей корреляции. Эти области, представленные в виде пикселей мозаичных карт, соответствуют физически выделенным скоплениям материи или, возможно, физическим эффектам, например, в нашей Галактике, таким как Холодное Пятно [56]. В следующих работах мы применим метод эволюционных корреляций как к более точным картам CMB, так и к каталогам других диапазонов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за критические замечания, позволившие улучшить текст и оформление работы, а также расширить обсуждение результатов. В данной работе авторы использовали базы данных SDSS [8], CATS (<http://cats.sao.ru>) [57, 58], систему обработки радиоастрономических данных FADPS (http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html) [59, 60] и пакет GLESP [51, 61] для анализа данных на сфере. Мы благодарим NASA за возможность

использования архива (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные WMAP. Исследования по данной теме были поддержаны грантом РФФИ по. 13-02-00027.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 1 (2003).
2. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 288 (2007).
3. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 225 (2009).
4. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 14 (2011).
5. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., *Astrophys. J. Suppl.* (in press).
6. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 Results. I. Overview of Products and Scientific Results,” *Astronom. and Astrophys.* (in press); arXiv:1303.5062.
7. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. Van Dyk, et al., <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>.
8. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agueros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
9. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astronom. J.* **115**, 1693 (1998).
10. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 Results. XX. Cosmology from Sunyaev-Zel’dovich Cluster Counts,” *Astronom. and Astrophys.* (in press); arXiv:1305.5080.
11. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 results. XXI. Cosmology with the All-Sky Planck Compton Parameter Y-Map,” *Astronom. and Astrophys.* (in press); arXiv:1303.5081.
12. A. Kovács, I. Szapudi, B. R. Granett, and Z. Frei, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **431**, L28 (2013).
13. A. Rassat, J.-L. Starck, and F.-X. Dupé, arXiv:1303.4727.
14. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 Results. XIX. The Integrated Sachs-Wolfe Effect,” *Astronom. and Astrophys.* (in press); arXiv:1303.5079.
15. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 Results. XVIII. Gravitational Lensing-Infrared Background Correlation,” *Astronom. and Astrophys.* (in press); arXiv: 1303.5078.
16. A. Rassat and J.-L. Starck, arXiv:1303.5051.
17. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, *Phys. Rev. D* **68**, 123523 (2003).
18. K. Land and J. Magueijo, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 071301 (2005).
19. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **367**, 79 (2006).
20. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, *Astrophysical Bulletin* **63**, 216 (2008).
21. A. Gruppuso and C. Alessandro, *J. Cosmology Astropart. Phys.* **08**, 004 (2009).
22. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, *Phys. Rev. D* **83**, 3002 (2011).
23. M. Hansen, J. Kim, A. M. Frejsel, et al., *J. Cosmology Astropart. Phys.* **10**, 059 (2012).
24. T. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al. *Astrophys. J.* **629**, L1 (2005).
25. M. Demiański and A. Doroshkevich, *Phys. Rev. D* **75**, 123517 (2007).
26. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 Results. XXIII. Isotropy and Statistics of the CMB,” *Astronom. and Astrophys.* (in press); arXiv:1303.5083.
27. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, *Astrophys. J.* **147**, 73 (1967).
28. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, *Astrophys. and Space Sci.* **4**, 301 (1969).
29. R. A. Sunyaev and Ya. B. Zeldovich, *Astrophys. and Space Sci.* **7**, 3 (1970).
30. A. Lewis, *Phys. Rev. D* **71**, 083008 (2005).
31. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, M. Singh, et al., in *Proc. Int. Conf. on Problems of Practical Cosmology*, Eds. Yu. V. Baryshev, I. N. Taganov, and P. Teerikorpi (Russian Geograph. Soc., St. Petersburg, 2008), Vol. 2, p. 247.
32. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh, et al., *Astronomy Reports* **54**, 571 (2010).
33. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh, et al., *Astrophysical Bulletin* **66**, 171 (2011).
34. D. I. Solovyov and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 416 (2011).
35. O. V. Verkhodanov and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 1 (2012).
36. O. V. Verkhodanov, T. V. Keshelava, and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 245 (2012).
37. 2MASS team, *2MASS Second Incremental Data Release Catalogs and Tables* (2002).
38. F.-X. Dupe, A. Rassat, J.-L. Starck, and M. J. Fadili, arXiv:1010.2192.
39. Ya.-Ch. Cai, M. C. Neyrinck, I. Szapudi, et al., *Astrophys. J.* (in press).
40. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astronom. J.* **140**, 1868 (2010).
41. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 Results. XXIX. The Planck Catalogue of Sunyaev-Zel’dovich Sources,” *Astronom. and Astrophys.* (in press); arXiv:1303.5089.
42. A. Kashlinsky, F. Atrio-Barandela, H. Ebeling, et al., *Astrophys. J.* **712**, 81 (2010).
43. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **66**, 183 (2011).
44. Zhigang Li, Pengjie Zhang, Xuelei Chen, arXiv:1209.0520.
45. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck Intermediate Results. XIII. Constraints on Peculiar Velocities,” *Astronom. and Astrophys.* (in press); arXiv:1303.5090.
46. J. P. Huchra, L. M. Macri, and K. L. Masters, *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 26 (2012).

47. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Intern. J. Modern Phys. **14**, 275 (2003).
48. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, Astrophysical Bulletin **64**, 263 (2009).
49. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **65**, 390 (2010).
50. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S.V.Karpov, Astrophysical Bulletin **65**, 238 (2010).
51. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Intern. J. Modern Phys. **20**, 1053 (2011).
52. J. Yadav, S. Bharadwaj, B. Pandey, and T. R. Seshadri, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **364**, 601 (2005).
53. P. Sarkar, J. Yadav, B. Pandey, and S. Bharadwaj, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **399**, L128 (2009).
54. F. Sylos Labini and Y. V. Baryshev, J. Cosmology Astropart. Phys. **6**, 021 (2010).
55. W. A. Watson, I. T. Iliev, J. M. Diego, et al., arXiv:1305.1976.
56. M. Hansen, W. Zhao, A. M. Frejsel, et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **426**, 57 (2012).
57. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005).
58. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Data Science Journal **8**, 34 (2009).
59. O. V. Verkhodanov, ASP Conf. Ser., **125**, 46 (1997).
60. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
61. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).

Correlation Properties of the WMAP CMB and 2MRS and SDSS Catalogs at Different Redshifts

Ya. V. Naiden, O. V. Verkhodanov

We have calculated mosaic correlation maps based on the ILC WMAP microwave background data and infrared and optical extragalactic object positions according to the 2MRS catalog and the SDSS survey respectively. Using the histograms of signal values in pixels and angular power spectra, we have investigated the statistical properties of these maps. Evolution power spectra of correlation maps, depending on z , were built. We show that there are certain correlation scales (2° – 3°) at different redshifts ($z = 1$ – 2), which can match the size of the maximal heterogeneity cell (60–90 Mpc) during different cosmological epochs.

Keywords: *cosmic background radiation*