

УДК 524.827

ПРОЯВЛЯЕТСЯ ЛИ ВКЛАД ИНФРАКРАСНЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ИСТОЧНИКОВ НА НИЗКИХ ГАРМОНИКАХ МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА?

© 2012 О. В. Верходанов*, Я. В. Найден**

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 08 июля 2011 г.; принята в печать 18 октября 2011 г.

Рассчитаны и изучены карты мозаичных корреляций данных микроволнового фона ILC WMAP и положений инфракрасных и субмиллиметровых источников. С помощью гистограмм значений сигналов в пикселях и угловых спектров мощности исследованы статистические свойства этих карт. Обнаружено одинаковое поведение ряда гармоник в картах корреляций с объектами каталогов FSC IRAS, 2MASX и Planck. Среди них выделяются мультиполи $\ell = 6$ для данных FSC и Planck и $\ell = 3$ для данных списка источников Planck, которые могут отражать реальное распределение источников излучения.

Ключевые слова: *космология; реликтовое излучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Один из самых обсуждаемых результатов миссии WMAP¹ [1–7] — необычные (негаусовы) свойства низких пространственных гармоник (мультиполи $2 \leq \ell \leq 20$). На самые низкие мультиполи: квадруполь ($\ell = 2$) и октуполь ($\ell = 3$), выравненные вдоль плоскости (свойство планарности) и относительно друг друга, сразу после публикации первого релиза данных WMAP обратили внимание Tegmark и др. [8]. Ось, вдоль которой располагаются экстремумы этих мультиполей в карте WMAP, была названа впоследствии Осью Зла [9]. Следует сказать, что эта ось не является единственной выделенной осью в данных миссии. Естественная выделенная ось в данных WMAP совпадает с плоскостью Галактики. В следующих релизах данных миссии WMAP [4–6] существование Оси Зла было также подтверждено. Были сделаны различные оценки значимости существования этой оси и высказано несколько гипотез о ее происхождении. В разных работах (например, [10, 11]) исследовался вклад фоновых компонент и их влияние на выравнивание мультиполей ($\ell = 2$ и $\ell = 3$), и отмечалась маловероятность влияния фона на ориентацию низких мультиполей. В работе [10], где для оценок эффекта применялись мультипольные вектора, также замечено, что положение осей квадруполь и

октуполя соответствует геометрии и направлению движения Солнечной системы и перпендикулярно эклиптической плоскости и плоскости, задаваемой направлением на диполь. Случайность такого эффекта авторы оценивают как маловероятную на уровне достоверности более 98% и исключают влияние остатков вклада от фоновых компонент.

В продолжение проводимых работ авторы [12] заключают, что характеристики низких мультиполей аномально сильно отличаются от случайных, что может быть обусловлено статистической неизотропностью Вселенной на больших масштабах, либо проблемами восстановления сигнала методом ILC (Internal Linear Combination — внутренняя линейная комбинация). Авторы [13] отмечают, что планарность квадруполь и октуполя не является статистически значимой. Они также подчеркивают, что остаточное излучение фонов в карте ILC не влияет существенно на уровень эффекта. Неустойчивость восстановления сигнала методом ILC также исследовалась в работах [14, 15], где было показано, что это метод приводит к байесу в корреляциях гармоник восстановленного сигнала и фоновых компонент, говорящих о проникновении фаз фонового сигнала в восстанавливаемую карту. Причем при восстановлении у амплитуд четных гармонических мод ($\ell + m$) может происходить изменение знака. При восстановлении знака в более вероятном случае существование Оси Зла не подтверждается. Аналогичный результат может быть получен и при пиксельном разделении компонент при выборе разных концептуальных подходов [16].

*E-mail: vo@sao.ru

**E-mail: yarnaid@mail.ru

¹<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

Но во всех случаях форма октуполя (положение пятен) сохраняется, причем его формируют, как минимум, два холодных и одно горячее пятна, являющиеся негауссовыми по распределению экстремумов сигнала в их зонах [17]. Как мы покажем в этой работе, другие низкие гармоники карты ILC также могут проявиться, как выделенные, в различных способах корреляционного анализа данных. Необходимо отметить, что команда WMAP предполагает, что аномалии низких мультиполей находятся в рамках допустимого уровня флуктуаций [7].

Другим методом, основанном на корреляциях в пиксельном пространстве, применяемом для анализа качества восстановленного сигнала, стало картографирование мозаичных корреляций фоновых излучений [18–20]. В результате анализа мозаичных карт был обнаружен байес в распределении пиксельных корреляционных коэффициентов в картах CMB (Cosmic Microwave Background) и пылевой компоненты, и было показано, что низкие мультиполи “знают” не только об эклиптической системе координат, но и об экваториальной [19, 20]. Выделенность эклиптической системы также было продемонстрировано при поиске неоднородности карты микроволнового фона по угловому спектру мощности [21, 22]. Природа выделенности “земных” систем координат остается невыясненной, хотя в ряде работ обсуждались, кроме случайной выделенности систем и обусловленностью топологией Вселенной, более “физические” подходы. Отметим среди них возможную связь положения осей квадруполя и октуполя, соответствующих геометрии и направлению движения Солнечной системы и перпендикулярных эклиптической плоскости и плоскости, задаваемой направлением на диполь карты ILC [10]; возможное наличие пылевой компоненты в плоскости эклиптики, где несмотря на слабость вклада зодиакальной пыли [11], не исключено пока влияние силикатных конденсатов [23]; наличие микроволнового фона, определяемого солнечным ветром или влияние хвоста магнитосферы Земли [19]; результаты исследований в этом направлении, представленные в виде карт распределения сигнала на полной сфере, пока отсутствуют; кроме того, подобный фон должен быть переменным в связи с активностью Солнца [19]; возможен также и остаточный шум, связанный с неравномерной чувствительностью в пикселе WMAP в зависимости от удаленности от плоскости эклиптики. Одним из возможных эффектов, обсуждавшимся в [19] и проявляющимся в низких мультиполях, может быть открытое недавно инфракрас-

ным телескопом NASA Spitzer² [24] гигантское пылевое кольцо размером более градуса, которое должно дать вклад в излучение в плоскости эклиптики в результате множественных прохождений через диаграмму направленности антенны WMAP. Уровень такого вклада в микроволновом диапазоне не оценивался.

В данной работе мы исследуем мозаичные карты корреляций каталога слабых источников (FSC) [25] обзора IRAS [26], субмиллиметровых объектов миссии Planck³ [27] и карты ILC WMAP релиза семи лет наблюдений [6]. Обнаруженный в [19] байес в корреляциях пыли и микроволнового фона на низких пространственных частотах представляет интерес для исследований в далеком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах, где положение источников излучения может быть признаком наличия облаков холодного газа [28], пылевых формирований или других протяженных объектов галактической среды. Именно поэтому наличие корреляций в положении слабых источников IRAS и протяженных объектов 2MASS с распределенным излучением микроволнового фона WMAP может дать дополнительную информацию об обнаруженном эффекте. Появление каталога субмиллиметровых объектов миссии Planck позволяет расширить диапазон корреляционных исследований в субтерагерцовую область. Ниже мы кратко опишем применяемый подход в построении карты мозаичных корреляций, дадим описание используемым данным и исследуем свойства аномальных гармоник корреляционных карт данных ILC WMAP и источников субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов.

2. МОЗАИЧНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

2.1. Данные

Для поиска возможных корреляций между картами протяженного излучения и положением инфракрасных объектов мы использовали данные разных диапазонов, краткое описание которых приводим ниже в этом разделе.

Карта ILC WMAP. В качестве карты CMB мы использовали карту распределения анизотропии микроволнового фона, восстановленную из многочастотных наблюдений методом внутренней линейной комбинации фоновых компонент семилетнего релиза данных [6]. 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).

²http://science.nasa.gov/headlines/y2009/07oct_giantring.htm

³<http://www.rssd.esa.int/Planck/>

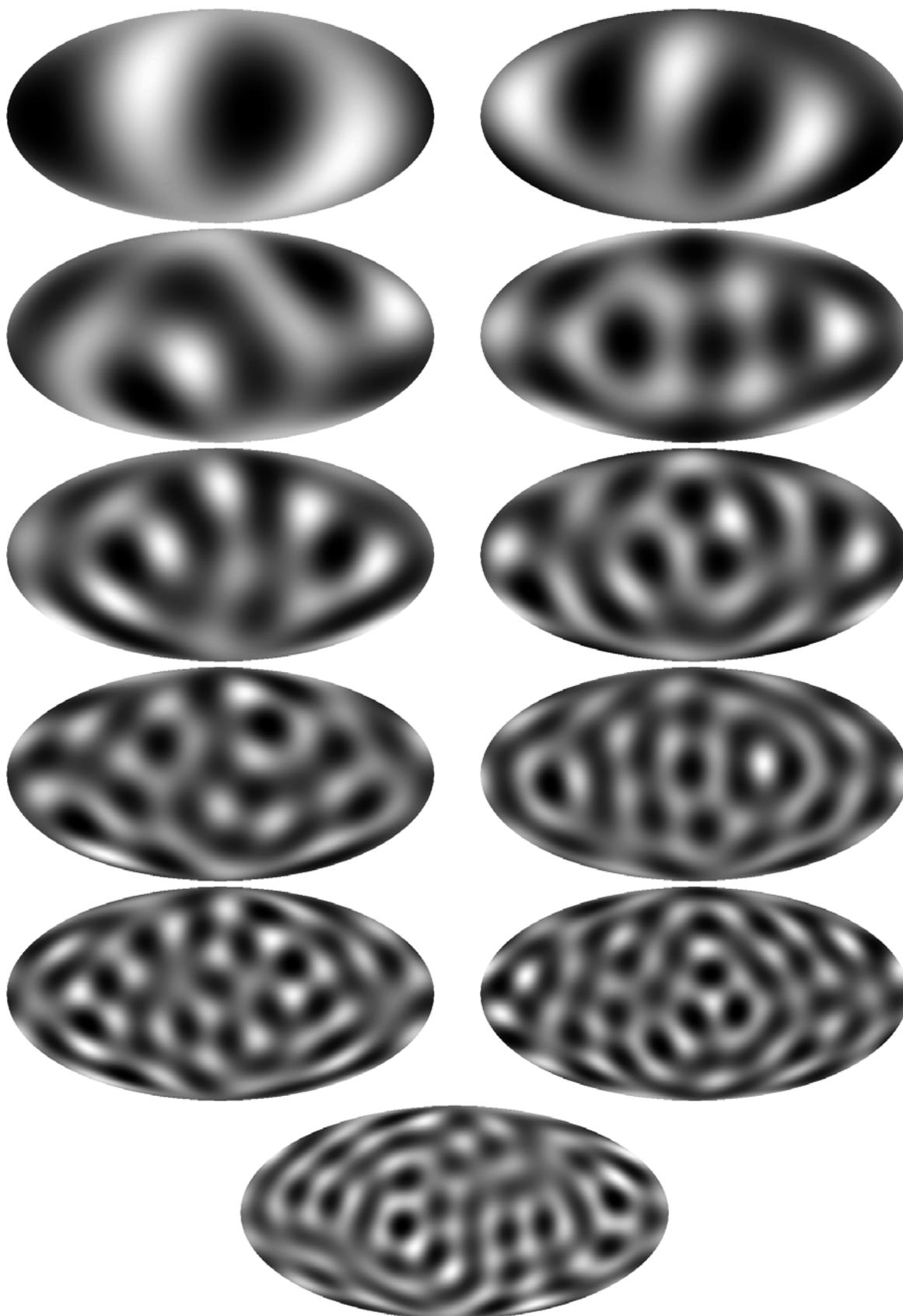


Рис. 1. Карты низких мультиполей данных ILC WMAP: рост ℓ справа налево сверху вниз, $2 \leq \ell \leq 12$.

Таблица 1. Вероятности случайного появления мощных гармоник в корреляциях исследуемых каталогов со картами случайного гауссова поля СМВ в космологии Λ CDM.

Канал	Размер окна, угловые минуты	ℓ	Вероятность
Band	2MASS		
Ks	300	12	0.183
Ks	600	4	0.117
ГГц	Planck		
30	600	3	0.084
30	900	3	0.098
44	300	11	0.057
70	600	8	0.017
70	300	11	0.059
100	300	4	0.045
143	300	4	0.113
217	300	3	0.196
217	300	6	0.023
217	600	3	0.097
353	900	2	0.039
545	300	3	0.072
545	900	2	0.030
857	300	3	0.114
857	300	6	0.117
857	900	2	0.011
μm	FSC IRA		
12	300	6	0.027
12	600	6	0.120
25	300	6	0.025
25	600	6	0.080
60	300	6	0.322
60	600	6	0.378
100	300	6	0.670
100	600	6	0.891
100	600	7	0.534

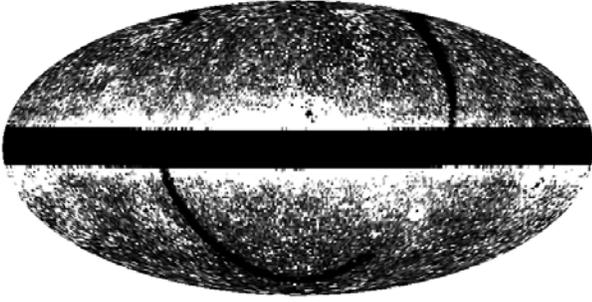


Рис. 2. Положение объектов каталога FSC на сфере в галактических координатах. Показаны источники на длине волны 100 мк. Полоса в плоскости Галактики $|b| < 10^\circ$ экранирована.

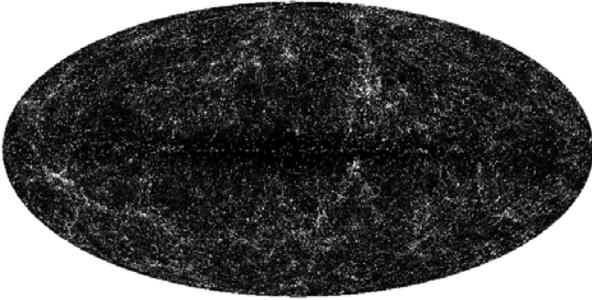


Рис. 3. Положение объектов каталога 2MASX на сфере в галактических координатах.

Карта ILC содержит информацию о распределении микроволнового фона для не очень высоких гармоник ($\ell \leq 150$). Тем не менее, это наиболее проверенная и используемая карта СМВ в настоящее время. В результате анализа данных получены карты не только анизотропии, но и поляризации СМВ, фоновых компонент (синхротронного и свободно-свободного излучения, излучений пыли), а также рассчитаны их угловые спектры мощности C_ℓ . При анализе карты ILC для разложения по сферическим гармоникам мы использовали пакет GLESP⁴ [29], где в соответствии с разложением вариаций температуры по мультиполям (сферическим гармоникам) имеем:

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

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

⁴<http://www.glesp.nbi.dk>

соответственно. Угловой спектр мощности карты на сфере определяется как

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

Положение низких мультиполей ($2 \leq \ell \leq 12$) на небесной сфере показано на Рис. 1.

Каталог слабых источников миссии IRAS. Инфракрасный астрономический спутник IRAS (Infrared Astronomical Satellite) провел в 1983 г. обзор небесной сферы на четырех длинах волн: 12 микрон (25 ТГц), 25, 60 и 100 мк (3 ТГц). В результате был получен каталог точечных источников (PSC), содержащий около 246000 объектов [26]. Обзор слабых источников IRAS (с галактическими широтами $|b| > 10^\circ$) имеет лучшую чувствительность (примерно на 1 зв. величину) по отношению к PSC. Каталог источников этого обзора (FSC — Faint Source Catalog), содержащий около 236000 объектов, для слабейших источников имеет достоверность порядка 99% на 12 и 25 мк и 80% на 60 и 100 мк. Отметим, что ~20% “ложных” объектов, согласно [25], являются результатом излучения инфракрасных циррусов. Расположение источников FSC на длине волны 100 мк на небесной сфере показано на Рис.2.

Каталог 2MASX. Каталог всего неба 2MASS (2 Micron All-Sky Survey)[30] получен в результате обзора, проведенного на 1.3 м телескопах на Mt. Hopkins (Arizona) и Серго Tololo (Chile), и включает каталог 470992970 точечных объектов (PSC) и каталог протяженных источников XSC (или 2MASX), содержащий 1647599 объектов, преимущественно галактик (~90%) в трех цветовых полосах: J (≤ 15.1 зв.в.), H и Ks (≤ 13.5 зв.в.) [31]. Порядка 2–5% объектов XSC являются областями путаницы из-за двойных звезд или артефактов (например, содержащих часть излучения ярких звезд). Положение объектов 2MASX на небесной сфере показано на Рис.3.

Каталог миссии Planck. Используемая версия каталога источников, обнаруженных миссией Planck [27], получена в результате картографирования полной сферы плюс 60% всего неба за второй год миссии. Полный каталог содержит источники, зарегистрированные на 9 частотных каналах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 857 ГГц. Соответствующие пределы обнаружения на уровне 10 сигма составили для широт $|b| > 30^\circ$ 0.49, 1.0, 0.67, 0.5, 0.33, 0.28, 0.25, 0.47 и 0.82 Ян. Каталог включает звезды с пылевыми оболочками, радиогалактики, блазары, яркие инфракрасные галактики, холодные молекулярные облака, особенности галактической межзвездной среды, кандидаты

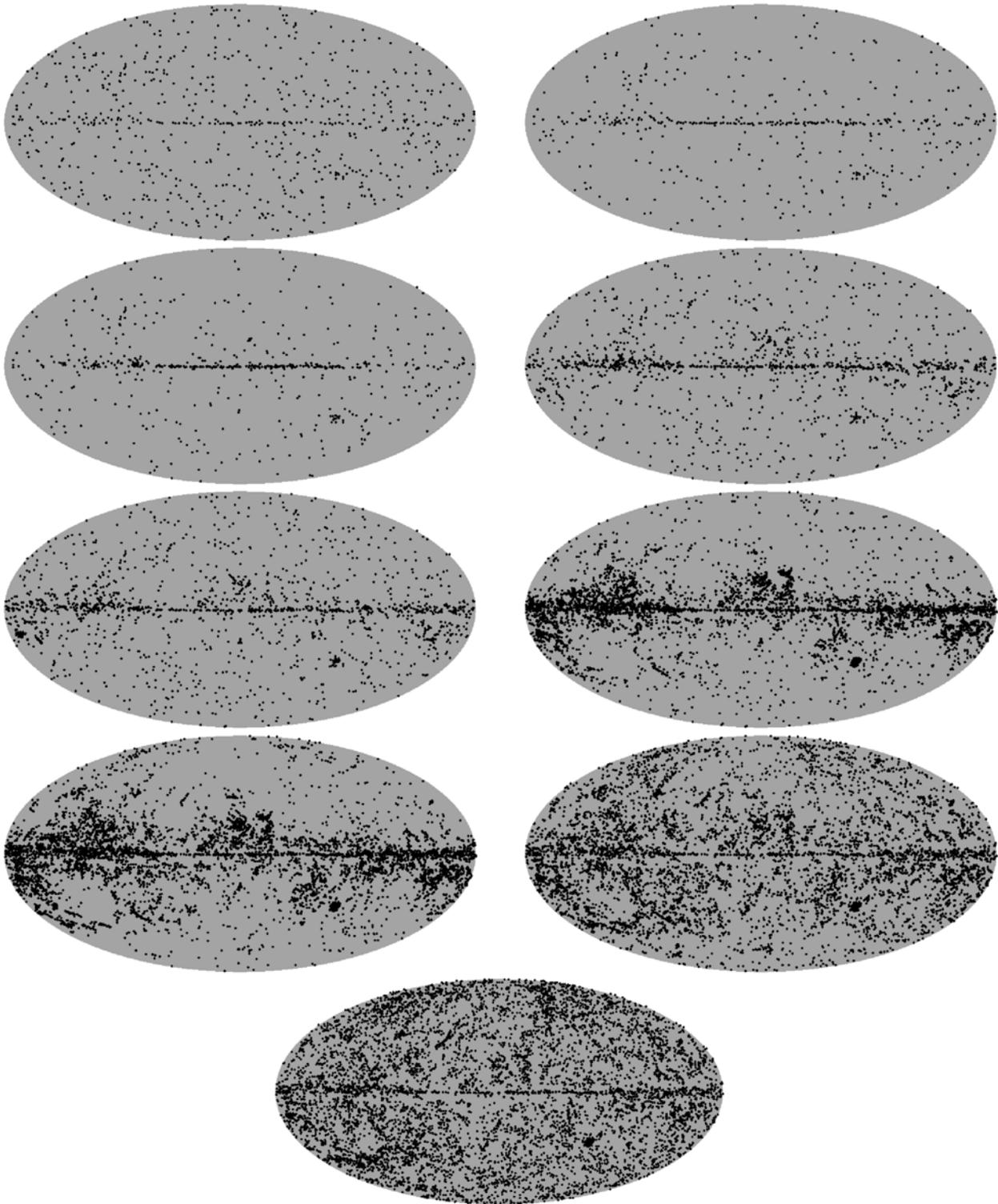


Рис. 4. Положение источников каталога Planck на сфере в галактических координатах. Справа налево сверху вниз источники на частотах 30 ГГц (705 объектов), 44 (452), 70 (599), 100 (1381), 143 (1764), 217 (5470), 353 (6984), 545 (7223) и 857 ГГц (8988 объектов).

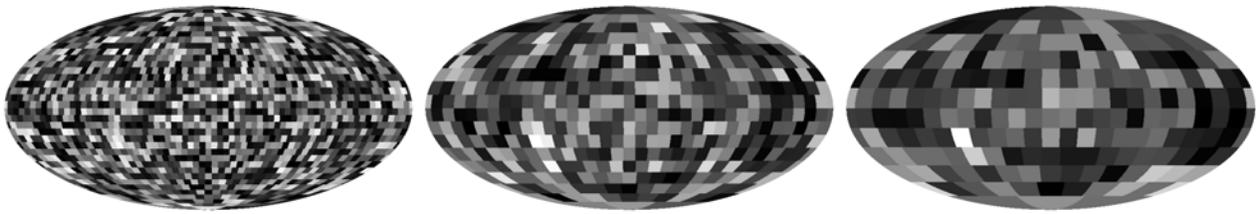


Рис. 5. Карты мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога 2MASX для различных окон ($300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах.

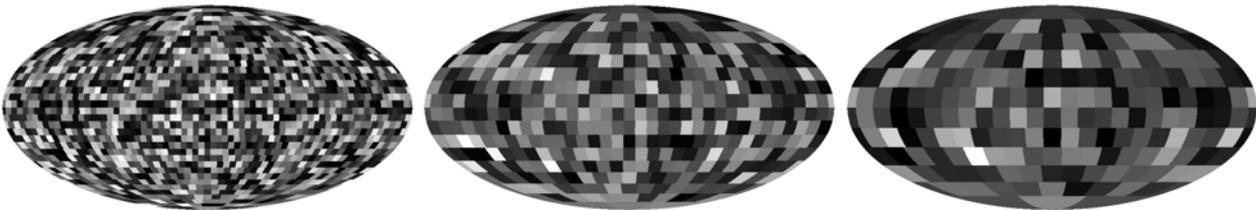


Рис. 6. Карты мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога FSC на 100 мк для различных окон ($300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах.

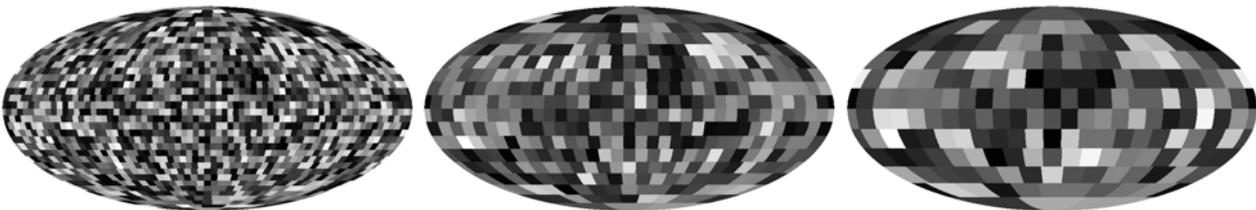


Рис. 7. Карты мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога Planck на 217 ГГц для различных окон ($300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах.

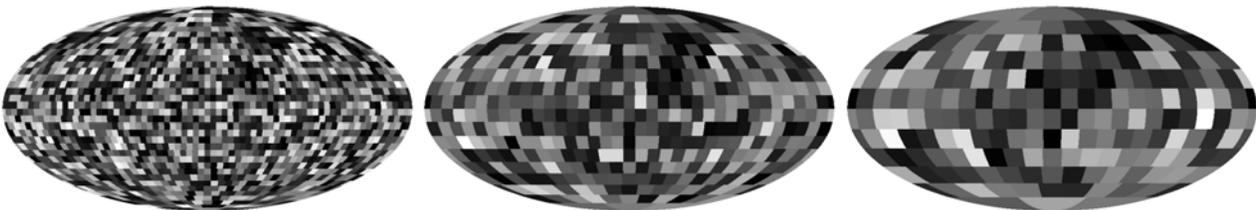


Рис. 8. Карты мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога Planck на 857 ГГц для различных окон ($300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах.

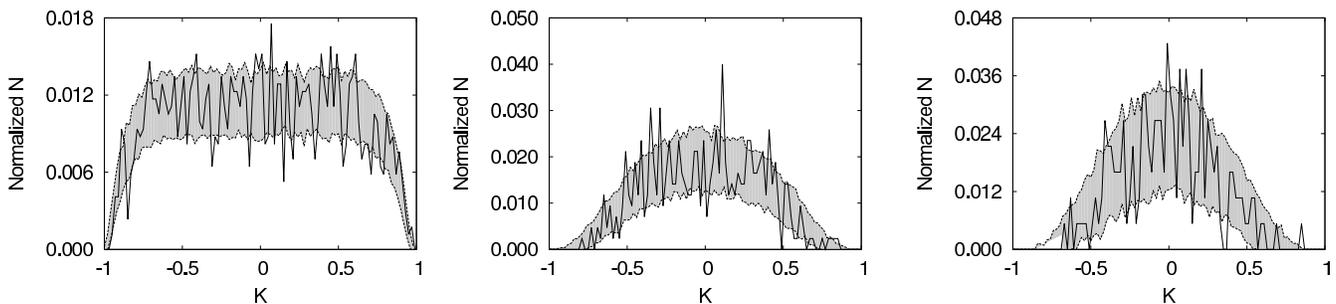


Рис. 9. Нормированные гистограммы распределения значения пикселей карты корреляций данных FSC (на 100 мк) и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — $300'$, $600'$, $900'$). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных FSC с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

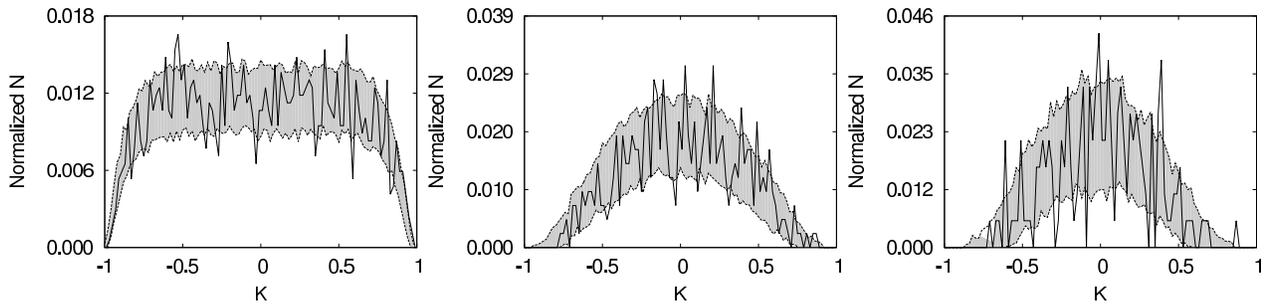


Рис. 10. Нормированные гистограммы распределения значения пикселей карты корреляций данных 2MASX (плотности потока в фильтре K_s) и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — $300'$, $600'$, $900'$). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных 2MASX с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

в скопления с эффектом Зельдовича–Сюняева и неклассифицируемые источники. Расположение источников на небе показано на Рис.4.

2.2. Процедура корреляции

Для построения карты корреляций мы использовали подход, предложенный в работах [18, 20] и процедурно реализованный во второй версии пакета GLESP [41] (утилита “difmap”), позволяющий 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 подлежащей 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 пикселей на сфере) с углом Ξ_p , вычисляемый для карт на сфере с исходным разрешением, определяемым ℓ_{max} , есть

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

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 другого сигнала на такой же площадке, $\overline{T(\Xi_p)}$ и $\overline{S(\Xi_p)}$ — средние значения в площадке 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 гармоническом пространстве для приведения их к одному разрешению.

2.3. Карты корреляций и их спектры

В результате описанной процедуры мы построили карты, отражающие корреляционное поведение на сфере исследуемых сигналов и СМВ на различных угловых масштабах. Для анализа использовались карты с относительно гладким сигналом, полученным при сглаживании $\theta = 10^\circ$. На Рис. 5 (данные 2MASX) и 6 (данные FSC) приведены мозаичные карты для корреляционных площадок со сторонами $w = 300'$ (максимальный мультиполь $\ell_{max} = 18$), $600'$ ($\ell_{max} = 9$) и $900'$ ($\ell_{max} = 5$). Для сравнения на Рис. 7 и 8 также показаны карты корреляций на тех же угловых масштабах для источников Planck, наблюдаемых на частотах 217 и 857 ГГц [27]. Будем обозначать мозаичные корреляционные карты как FSC vs ILC (корреляция положения источников FSC IRAS и распределение флуктуаций фона в данных ILC WMAP), 2MASX vs ILC (объекты 2MASX соответственно) и Planck vs ILC (источники каталогов Planck).

На Рис. 9, 10 и 11 показаны нормированные гистограммы пикселей мозаичных карт для каталогов FSC, 2MASX и Planck на различных угловых масштабах. Пунктирной линией отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса значений гистограмм соответствующих корреляционных карт с гауссовым случайным полем в Λ CDM-космологической модели.

На Рис. 12, 13 и 14 показаны угловые спектры мощности C_ℓ мозаичных карт для каталогов 2MASX, FSC и Planck на различных угловых масштабах. Пунктирной линией отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса значений C_ℓ у соответствующих корреляционных карт с гауссовым случайным полем в Λ CDM-космологической модели.

Как видно из графиков спектров мощности, существует ряд гармоник, выходящих по амплитуде за пределы 1σ -разброса для гауссовых возмущений в Λ CDM-космологии. Рассмотрим эти мультиполи отдельно.

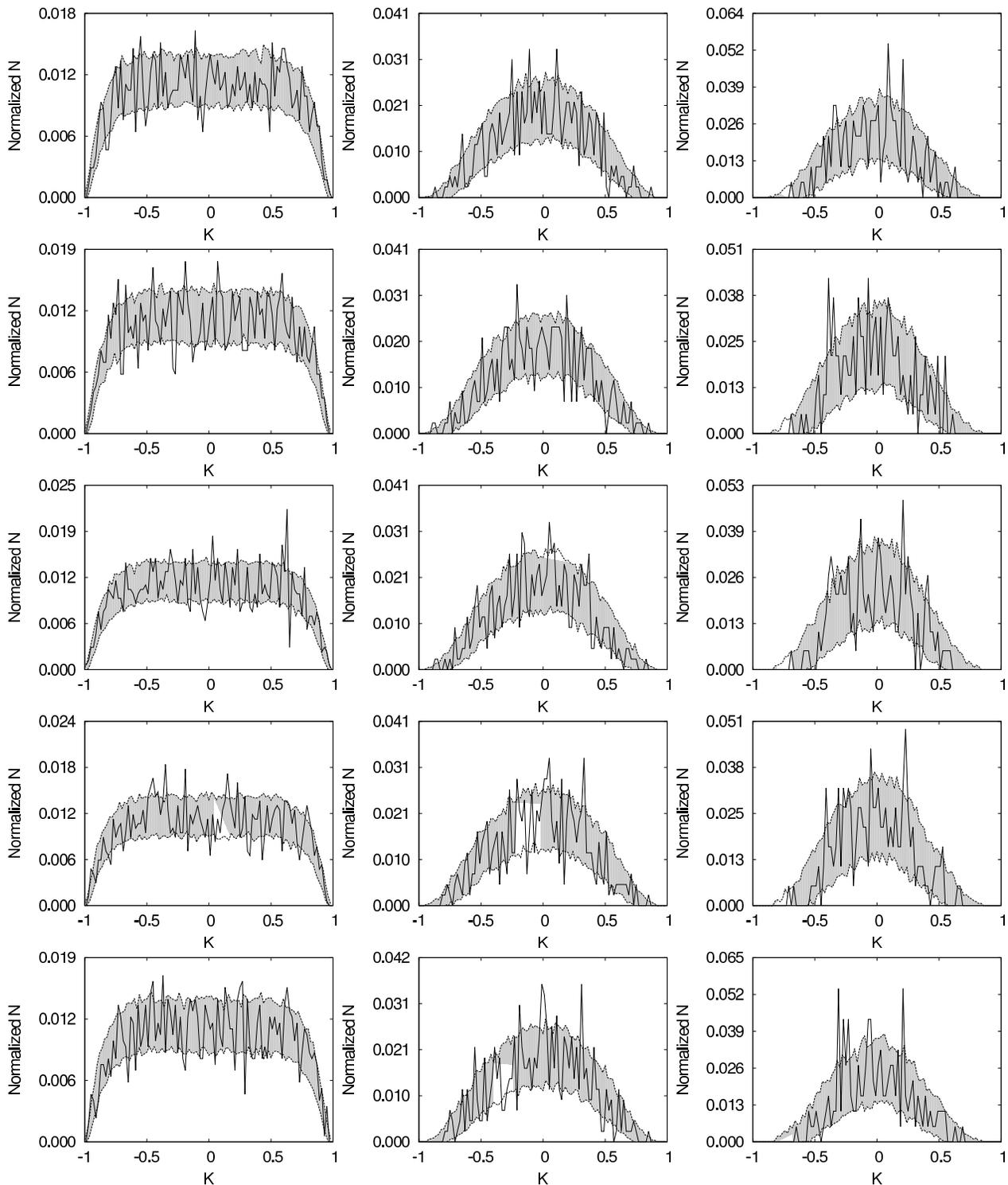


Рис. 11. Нормированные гистограммы распределения пикселей карты корреляций данных Planck и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — 300', 600', 900'; сверху вниз — данные для частотных каналов на 30, 44, 70, 100, 143 ГГц). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных Planck с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

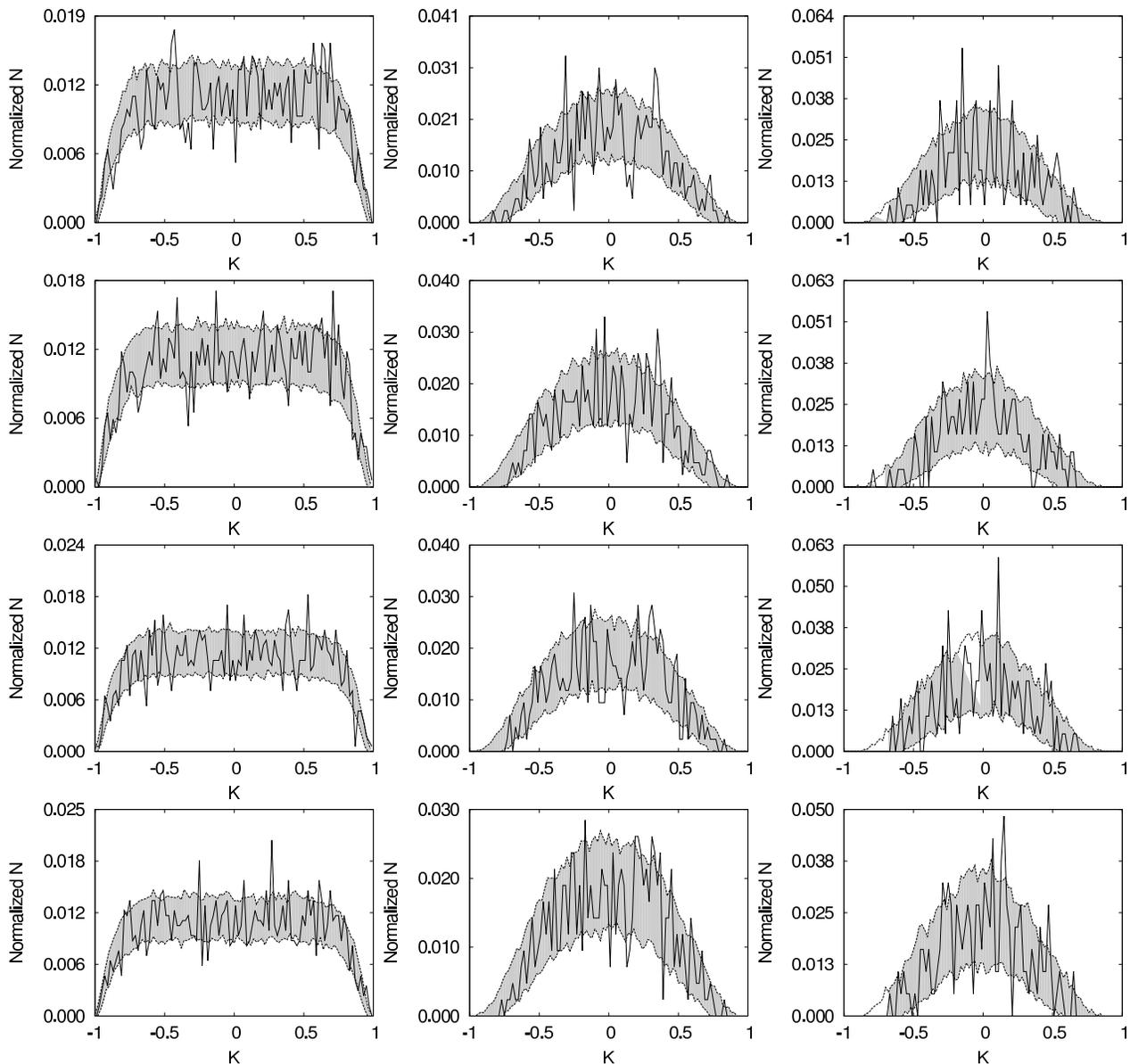


Рис. 11: продолжение. Данные для 217, 353, 545, 857 ГГц.

2.4. Мощные гармоники

Анализ спектра мощности карты корреляций FSC и WMAP ILC демонстрирует наличие усиленного сигнала для шестой гармоники на масштабах корреляций $300'$ и $600'$. Превышение сигнала у мультиполя $\ell = 6$ наблюдается для данных FSC на длинах волн 12 и 25 мк, в то время как на 60 и 100 мк его нет. На Рис. 15 приведена карта гармоники с наложенной эклиптической системой координат.

Существенным моментом в распределении сигнала этой гармоники является наличие на карте двух выделенных седловидных точек, в которые попадают эклиптические полюса, а также избегание контрастными пятнами плоскости эклиптики, в результате чего эта плоскость лежит в области

минимального по амплитуде сигнала. В то же время два самых холодных пятна мультиполя (на Севере и Юге, Рис. 15) строго лежат на нулевом склонении в экваториальной системе координат.

Карта корреляций данных 2MASX и ILC WMAP имеет несколько сильных гармоник, выходящих за границу 1σ -разброса и дающих вклад в распределение коррелированного сигнала, как на Рис. 16.

Отметим 12-ую гармонику при корреляциях с размером пиксела $w = 300'$ и 7-ую гармонику для карты корреляций с $w = 600'$. На карте 12-ого мультиполя (Рис. 16) максимальные по амплитуде пики располагаются на оси Галактической плоскости, а полюса экваториальной системы координат

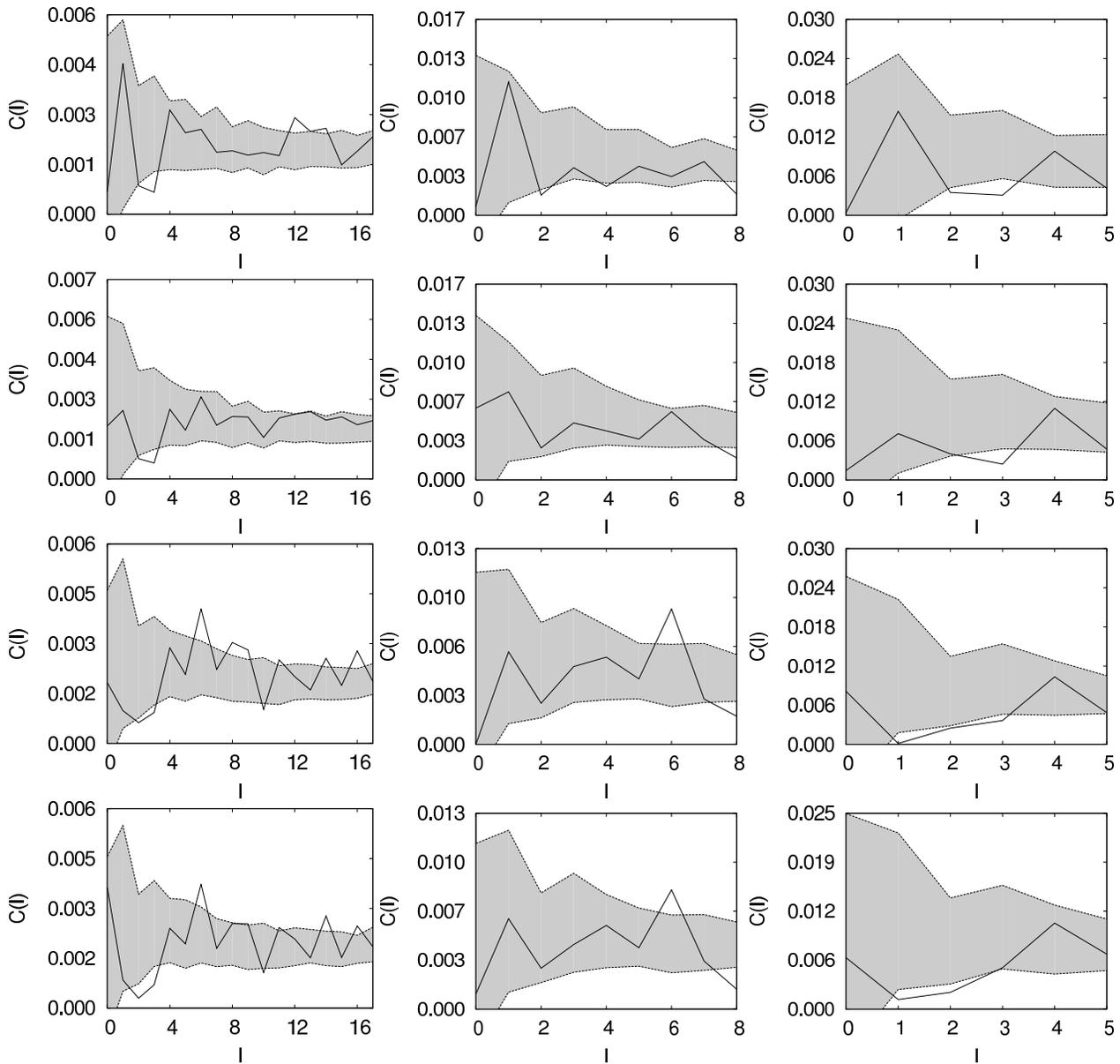


Рис. 12. Угловые спектры мощности карты корреляций данных FSC и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — 300', 600', 900'; сверху вниз — для данных FSC на 100, 60, 25 и 12 мк соответственно). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных FSC с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

лежат в седловидных точках. На карте 7-го мультиполя, кроме седловидных точек в полюсах, экваториальная система выделяется также симметрией пятен. На корреляционных масштабах 900' существует еще один пик на $\ell = 4$ (Рис. 13), о котором речь пойдет ниже при обсуждении свойств этих карт.

Карты выделенных гармоник при корреляциях с картами источников Planck показаны на Рис. 17.

Корреляции с источниками каталога Planck позволяют исследовать их распределение на сфере на различных длинах волн. Можно сразу выделить

две гармоники, проявляющиеся более чем в половине частотных каналах Planck и имеющие одинаковые распределения на сфере в этих каналах. Это мультиполь $\ell = 6$ карты с корреляционным окном $w = 300'$, выдающийся над уровнем 1σ в угловом спектре мощности на частотах 30, 100, 217, 343, 545 и 857 ГГц (Рис. 14), а также чрезвычайно мощный мультиполь $\ell = 3$ (октуполь) карты, полученной с корреляционным окном $w = 600'$, видимый на частотах 30, 44, 100, 143, 217 ГГц. Карта восьмой гармоники (Рис. 17) показывает практически строгую симметрию относительно

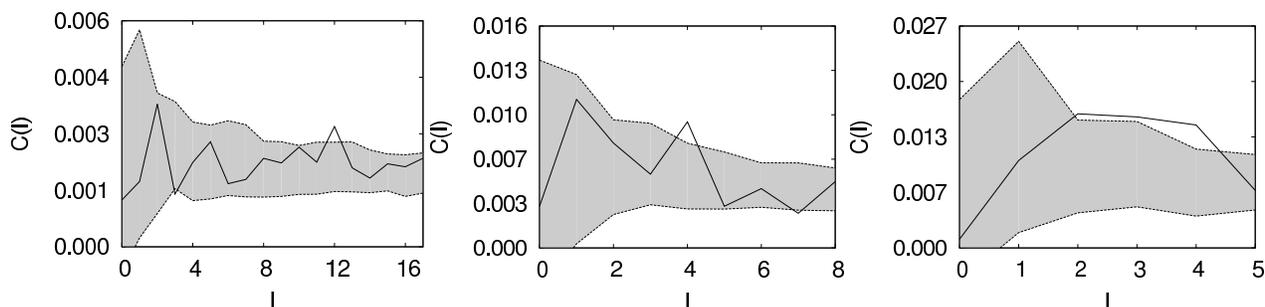


Рис. 13. Угловые спектры мощности карты корреляций данных 2MASX и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — 300', 600', 900'). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных 2MASX с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

плоскости Галактики. Свойства карт мультиполей $\ell = 6$ и $\ell = 3$ кажутся нам интересными, и мы их обсудим в следующем разделе. Двенадцатая гармоника имеет выделенную концентрацию пиков (уменьшение) в экваториальной плоскости, тем самым подчеркивая концентрацию коррелированного сигнала вне этой плоскости.

В дополнение к приведенным графикам на Рис. 14 отметим численные значения некоторых уровней вероятности (Таблица), рассчитанных как отношение числа событий, в которых достигается уровень 1σ , 2σ и 3σ к 10000 случайных моделей, в которых проявилась корреляция с картами случайного гауссова поля CMB в космологии Λ CDM.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы исследуем свойства гармоник карт корреляций, имеющих выдающиеся амплитуды в угловом спектре мощности. Любопытный момент заключается в том, что эти гармоники “знают” о трех системах координат: галактической, эклиптической и экваториальной. Особенность проявления галактической системы координат (см. гармоники $\ell = 12$ на Рис. 16 и $\ell = 8$ на Рис. 17) в корреляциях с источниками излучения кажется очевидной: с одной стороны, либо повышенная концентрация объектов в плоскости Галактики, либо их маскирование (как, например, в данных 2MASX), с другой стороны, явная выделенность Галактической плоскости как раздела неоднородности CMB сигнала в Южном и Северном галактических полушариях (см. также мультиполи ILC WMAP $\ell = 5$ и 9 на Рис. 1).

Гармоника $\ell = 6$ имеет схожие свойства (положение) и в данных ILC WMAP (Рис. 1), и в данных корреляций с FSC IRAS (Рис. 15), и в корреляциях с источниками Planck (Рис. 17). Одна из особенностей этой гармоники — ее чувствительность к эклиптической системе координат, что отмечено в предыдущем разделе. Схожесть мультиполей $\ell = 6$

карты ILC и карты FSC vs ILC, а также подтверждение в картах источников Planck vs ILC приводит к мысли о существовании структуры излучения, связанной с плоскостью эклиптики на масштабах, соответствующих $\ell = 6$ ($\Xi \sim 13.5^\circ$). Таким образом, возможно, что часть инфракрасных и субмиллиметровых источников из используемых каталогов отражает особенности структур таких размеров. Проявление экваториальной системы координат в корреляциях можно связать с подавлением сигнала в экваториальной плоскости, вызванном экранированием излучения облаками заряженных частиц, фокусируемых магнитным полем Земли. Такое подавление сигнала, в частности, демонстрируется 12-ой гармоникой в мозаичной карте Planck vs ILC (Рис. 17).

Четвертая гармоника в корреляциях 2MASX vs ILC показывает сигнал, связанный с галактической системой координат. Это отражается, например, в том, что холодные и горячие пятна выстраиваются вдоль Галактической плоскости (Рис. 18). Любопытным моментом является подобие этой карты в Южном полушарии карте, построенной для сигнала эффекта Сакса–Вольфа (SWE) по тем же данным 2MASX и WMAP ILC в работе [32] (Рис. 18). Параллельность сигнала SWE плоскости Галактики может быть вызвана корреляционными свойствами (неполнотой информации в 2MASX и выделенностью плоскости Галактики в ILC WMAP), которые мы обнаружили в данном исследовании.

Самая мощная гармоника в изучаемых мозаичных картах $\ell = 3$ наблюдается при корреляциях с источниками Planck (ср. также с 12-ой гармоникой ILC на Рис. 1). Отметим сходство (положение, форма и направление) октуполя карты корреляций данных Planck vs ILC с Магеллановым Поток, наблюдающимся на 21 см и протянувшимся на сфере на $\sim 200^\circ$ [33] (Рис. 19).

Также обращает на себя внимание неравномерность распределения источников Planck различной

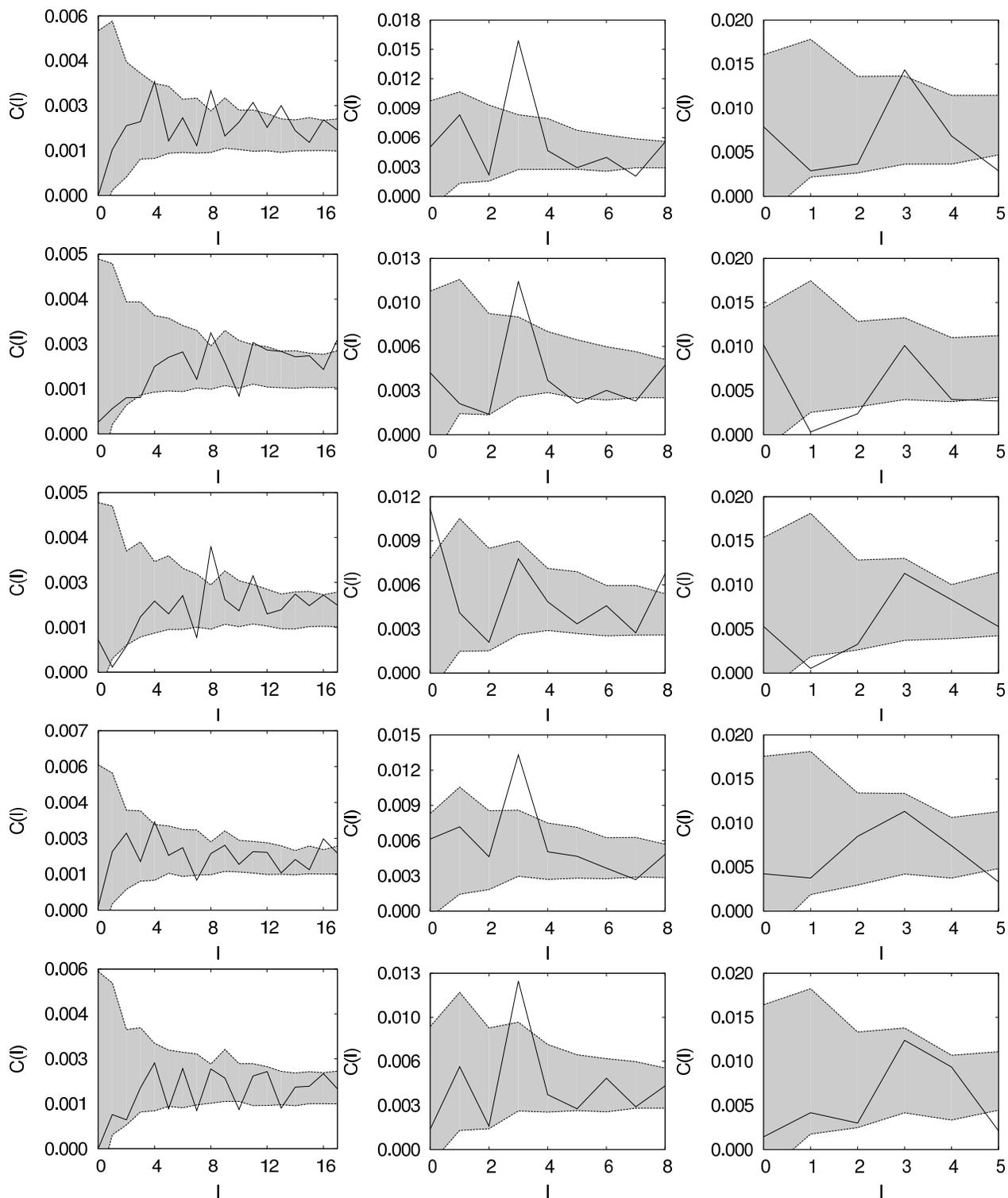


Рис. 14. Угловые спектры мощности карты корреляций данных Planck и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — 300', 600', 900'; сверху вниз — данные для частотных каналов на 30, 44, 70, 100, 143 ГГц). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных Planck с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели.

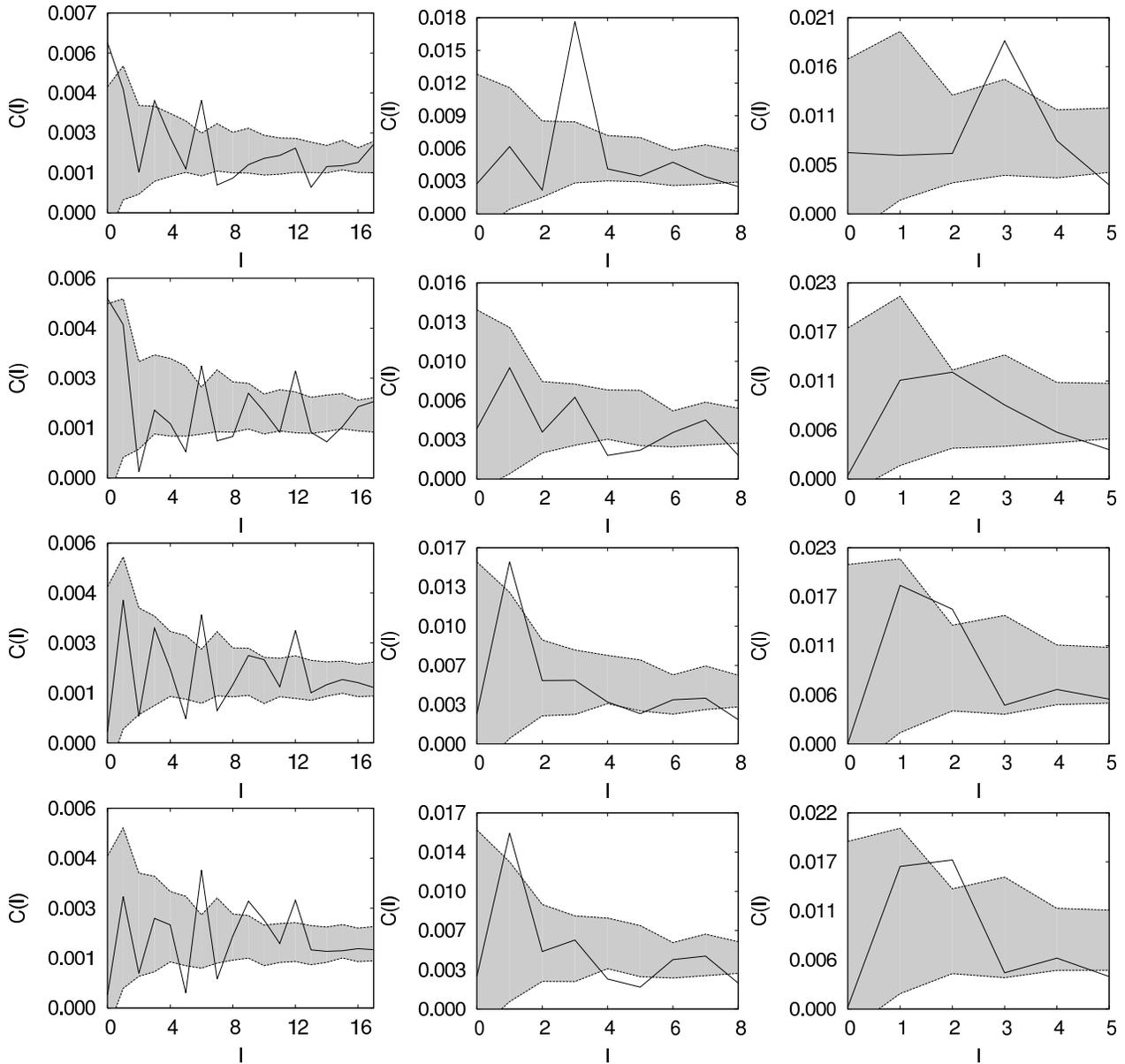


Рис. 14: продолжение. Данные для 217, 353, 545, 857 ГГц.

интенсивности на 857 ГГц. Несмотря на более-менее равномерное распределение числа объектов в Южном и Северном галактических полушариях (Рис. 4), распределение на сфере интенсивности сигнала от источников отличается в различных галактических квадрантах, что, в частности, легко обнаруживает квадруполь этой карты (Рис. 20; ср. с $\ell = 7$ и $\ell = 11$ на Рис. 1).

Таким образом, мы исследовали совместные свойства распределения CMB ILC WMAP и источников каталогов FSC IRAS, 2MASX и Planck методом мозаичных корреляционных карт. Мы обнаружили, что шестому мультиполю сигнала ILC WMAP соответствует 6-ой мультиполь в картах корреляций источников FSC vs ILC и

Planck vs ILC. Это может быть обусловлено наличием структур размером $\sim 13.5^\circ$, связанных с эклипстикой и проявляющихся в распределении микроволнового фона ILC WMAP и положении источников каталогов FSC и Planck, но не данных 2MASX. Данные 2MASX vs ILC демонстрируют структуры, определяемые, скорее всего, Галактикой. В распределении источников Planck и данных ILC WMAP проявляются также корреляционные свойства, соответствующие Магелланову Поток, что могло бы отражать положение облаков водорода в субмиллиметровом диапазоне, хотя подобный сигнал не наблюдается [18, 34] на 21 см при построении карты мозаичной корреляции между ILC WMAP и обзором NVSS [35].

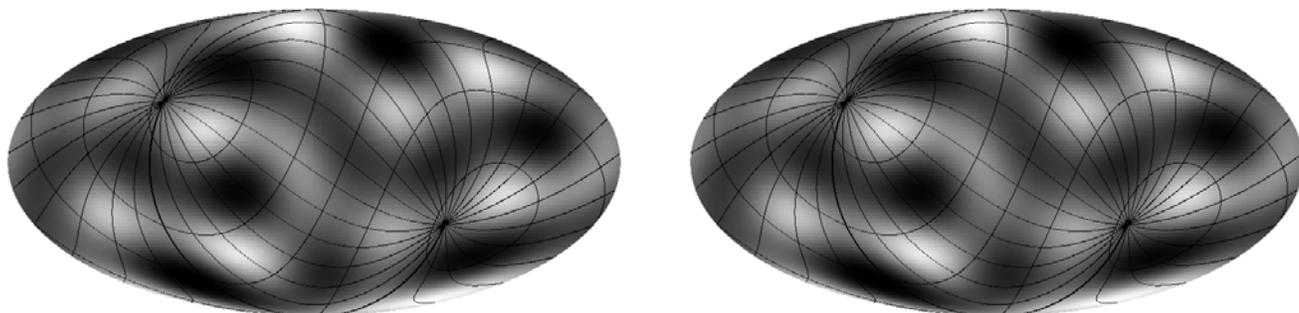


Рис. 15. Карта шестой гармоники корреляционного сигнала FSC (25 мк) и WMAP ILC с размером пиксела $600'$. Слева — с наложением эллиптической сетки координат, справа — экваториальной.

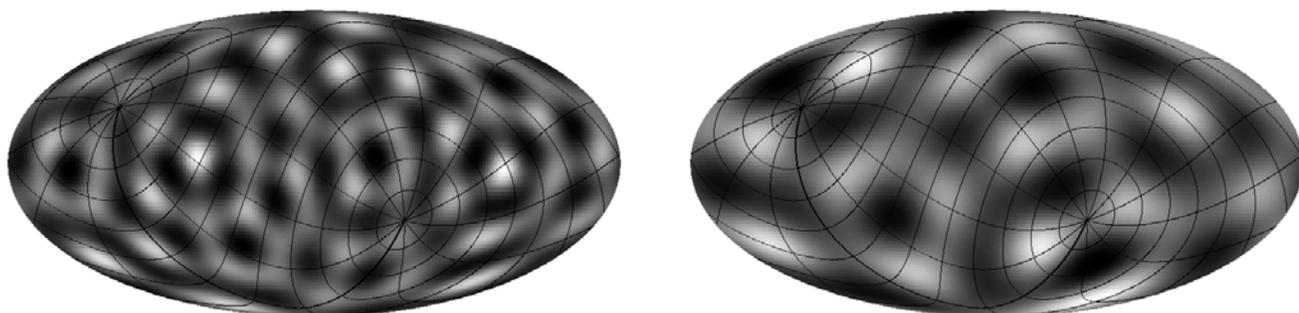


Рис. 16. Карты 12-ой (слева) и 7-ой (справа) гармоник корреляционного сигнала 2MASX и WMAP ILC с размерами пикселей $300'$ и $600'$, соответствующих пикам на Рис. 13. На карты наложена экваториальная сетка координат.

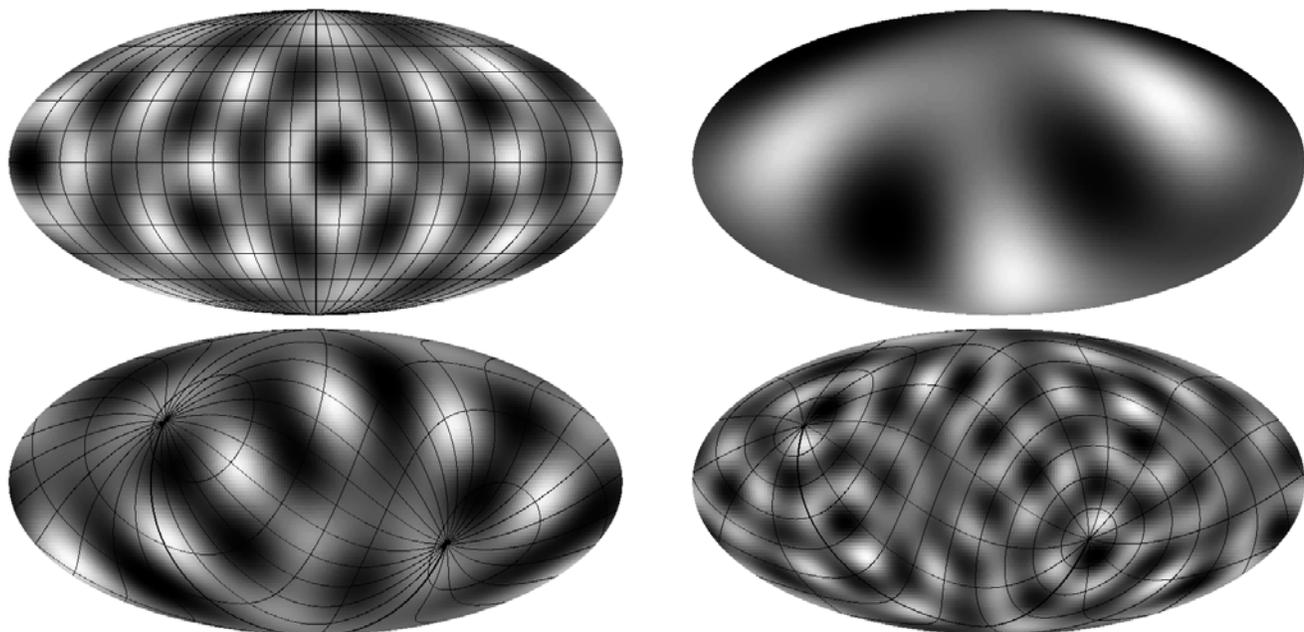


Рис. 17. Слева направо сверху вниз: карты 8-ой (на канале 70 ГГц, $w = 600'$), 3-ей (217 ГГц, $w = 600'$), 6-ой (857 ГГц, $w = 300'$) и 12-ой (857 ГГц, $w = 300'$) гармоник корреляционного сигнала Planck и WMAP ILC, соответствующих аномальным пикам на Рис. 14.

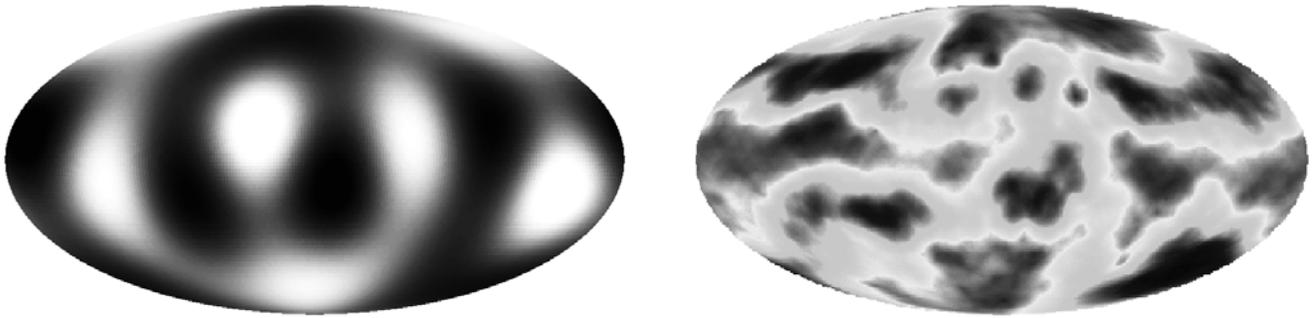


Рис. 18. Карта 4-ого мультиполя карты корреляций положения источников Planck и сигнала ILC WMAP (справа) и эффекта Сакса-Вольфа из работы [32] (слева).

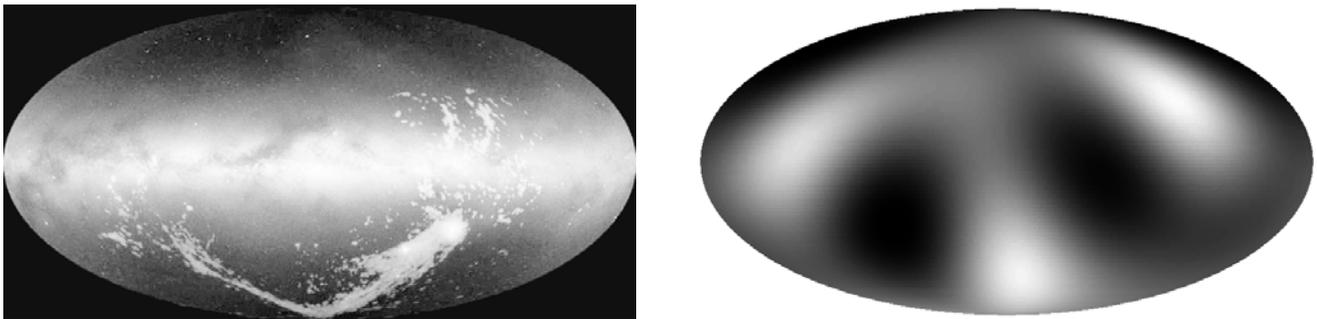


Рис. 19. Слева: карта Магелланова Потока (в Южном галактическом полушарии) по данным наблюдений на 21 см на радиотелескопах Грин Бэнк и Аресибо. Рисунок воспроизведен из работы [33]. Справа: карты 3-ей (217 ГГц , $w = 600'$), гармоники корреляционного сигнала Planck и WMAP ILC, соответствующей аномальному пику на Рис. 14 для корреляционных окон $w = 600'$ на различных частотах. Карты даны в галактических координатах.

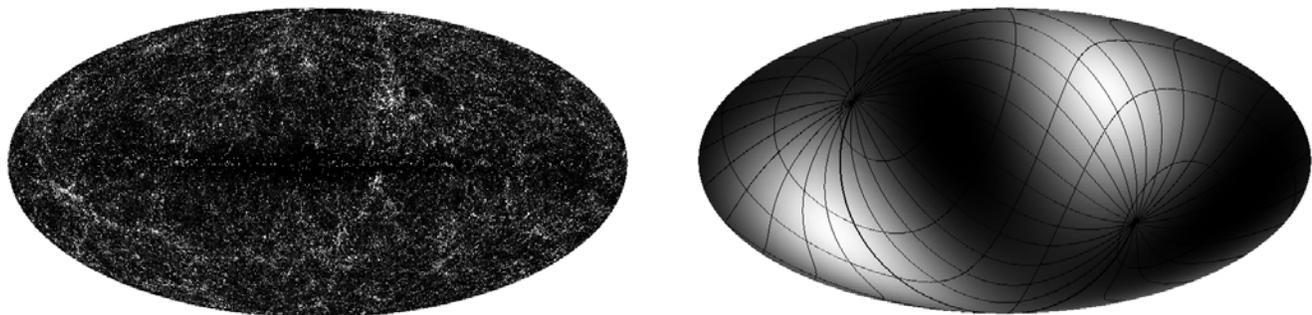


Рис. 20. Слева: карта источников на 857 ГГц с суммированием в пикселях по плотностям потока. Справа: квадруполь сглаженной карты. На карту наложена эклиптическая сетка координат.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны NASA за предоставленный архив с данными WMAP. В данной работе авторы использовали базу данных CATS⁵ [36, 37], систему обработки радиоастрономических данных FADPS⁶ [38, 39] и пакет GLESP [40, 41] для анализа данных на сфере. Работа была поддержана грантом РФФИ (№ 09-02-00298). О.В.В. также благодарит за поддержку Фонд Дмитрия Зимина “Династия”. Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 97 (2003), astro-ph/0302208.
3. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175 (2003), astro-ph/0302209.
4. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
5. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 225 (2009), astro-ph/0803.0732.
6. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 14 (2011), arXiv:1001.4744.
7. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 17 (2011), arXiv:1001.4758.
8. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, *Phys. Rev. D* **68**, 123523 (2003), astro-ph/03022496.
9. K. Land and J. Magueijo, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 071301 (2005).
10. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **367**, 79 (2006).
11. A. Gruppuso and C. Alessandro, *JCAP* **08**, 004 (2009).
12. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **399**, 295 (2009).
13. C.-G. Park, C. Park, and J. R. Gott III, *Astrophys. J.* **660**, 959 (2007), astro-ph/0608129.
14. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 203 (2007).
15. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, *Astrophysical Bulletin* **63**, 216 (2008), arXiv:0707.1484.
16. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, *Phys. Rev. D* **83**, 3002 (2011), arxiv:1008.4094.
17. O. V. Verkhodanov and A. A. Basova, *Astrophysical Bulletin* **66**, 407 (2011).
18. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **64**, 263 (2009).
19. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **65**, 390 (2010).
20. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S. V. Karpov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 238 (2010), arXiv:1009.3720.
21. M. Hansen, A. M. Frejsel, J. Kim, et al. arXiv:1103.6135 (2011).
22. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 345 (2011).
23. V. Dikarev, O. Preuss, S. Solanki, et al., *Astrophys. J.* **705**, 670 (2009).
24. W. Clavin, <http://www.spitzer.caltech.edu/-Media/releases/ssc2009-19/release.shtml> (2009).
25. C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., *Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases*, IRAS Faint source catalog (1988).
26. C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., *Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases*, V.1: Explanatory supplement (1988).
27. Planck Collaboration: P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al., *Astronom. and Astrophys.* **536A**, 7 (2011), arXiv:1101.2041.
28. Planck Collaboration: P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al., *Astronom. and Astrophys.* **536A**, 19 (2011), arXiv:1101.2029.
29. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Intern. J. Mod. Phys. D* **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
30. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. Van Dyk, et al., *Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release* (2002), <http://www.ipac.caltech.edu/2mass>.
31. 2MASS team, *2MASS Second Incremental Data Release Catalogs and Tables* (2002).
32. F.-X. Dupe, A. Rassat, J.-L. Starck, and M. J. Fadili, (2010), arXiv:1010.2192.
33. D. L. Nidever, S. R. Majewski, B. W. Butler, and L. Nigra, *Astrophys. J.* **723**, 1618 (2010), arXiv:1009.0001.
34. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, E. K. Majorova, and Yu. N. Parijskij, *Astrophysical Bulletin* **63**, 366 (2008), arXiv:0902.0281.
35. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astronom. J.* **115**, 1693 (1998).
36. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005), arXiv:0705.2959.
37. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Data Science Journal* **8**, 34 (2009), arXiv:0901.3118.
38. O. V. Verkhodanov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne, ASP Conf. Ser., **125**, 46 (1997).
39. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).

⁵<http://cats.sao.ru>

⁶http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html

40. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
41. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Intern. J. Mod. Phys. D, **20**, 1053 (2011), arXiv:0904.2517.

DOES THE CONTRIBUTION OF INFRARED AND SUBMILLIMETER SOURCES REVEAL ITSELF AT LOW HARMONICS OF THE CMB?

O. V. Verkhodanov, Ya. V. Naiden

We have computed and studied the mosaic correlation maps of the ILC WMAP microwave background data with the positions of infrared and submillimeter sources. Using the histograms of the signal values in pixels and angular power spectra, we studied the statistical properties of these maps. We discovered similar behavior of a number of harmonics in the maps of correlations with the FSC IRAS, 2MASX and Planck catalog objects. The most prominent multipoles among them, which may reflect the actual distribution of radiation sources are the $\ell = 6$ for the FSC and Planck data, and $\ell = 3$ for the Planck source data.

Keywords: *cosmology: cosmic background radiation surveys*