

УДК 524.827

## СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ И КАРТ НИЗКИХ ГАРМОНИК ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ WMAP И PLANCK

© 2014 О. В. Верходанов\*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 14 октября 2013 года; принята в печать 15 апреля 2014 года

Проводится сравнение угловых спектров мощности и карт, представленных командами миссий WMAP и Planck. Сравнение спектров проводится в диапазоне мультиполей ( $2 \leq \ell \leq 50$ ). Гармоники  $\ell = 5, 7, 13, 29, 37, 41-46$  имеют расхождение в угловых спектрах мощности. На этих пространственных частотах исследуются карты микроволнового фона и их фазовые характеристики. Показано, что несоответствие спектров вызвано различным учетом систематики, связанной с Галактикой, эклиптической и, возможно, Землей. Эти эффекты, приводящие к статистической анизотропии, могут быть ответственны и за обнаруженные аномалии в обоих экспериментах на низких гармониках.

Ключевые слова: *космический микроволновой фон — космология: наблюдения — методы: анализ данных*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Появление первого релиза данных о реликтовом фоне в эксперименте Европейского космического агентства (ESA) Planck<sup>1</sup> [1] открыло новые возможности при исследовании компонент фонового излучения и радиоисточников в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Наблюдения в эксперименте проводились на высокочастотном комплексе (High Frequency Instrument — HFI) с полосами на 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц и на низкочастотном (Low Frequency Instrument — LFI) с полосами на 30, 44, 70 ГГц. Спутник обращался вокруг точки L2 в системе Земля—Солнце. Разрешение карты реликтового фона (Cosmic Microwave Background — CMB) составило около 5'. Несмотря на то что миссия Planck вторична по отношению к другой космической миссии WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) NASA, она имеет лучшие наблюдательные характеристики. Среди них можно отметить более высокое разрешение (в три раза), давшее возможность измерить угловой спектр мощности до более высоких гармоник (т.е. больших величин  $\ell$ ), более высокую чувствительность (в десять раз) и девять частотных полос, улучшающих процедуру разделения фоновых компонент. Эти параметры Planck позволили получить новые, фактически независимые (от WMAP), наблюдательные данные. Архив

миссии Planck (Planck Legacy Archive — PLA<sup>2</sup>), содержащий карты компонент излучения, дает возможность исследовать сигнал CMB с различным разрешением и, в том числе, независимо проверить с большей или меньшей вероятностью аномальные свойства низких гармоник, измеренных в эксперименте WMAP [2].

Космическая миссия NASA WMAP<sup>3</sup> была направлена на измерение анизотропии и поляризации микроволнового фона. Наблюдения WMAP проводились в пяти полосах: 23 ГГц (полоса  $K$ ), 33 ГГц (полоса  $K_a$ ), 41 ГГц (полоса  $Q$ ), 61 ГГц (полоса  $V$ ) и 94 ГГц (полоса  $W$ ). Массивы данных предоставлялись на сайте для использования по итогам 1, 3, 5, 7 и 9 лет работы миссии [3–9]. В результате анализа данных, включающих регистрацию и запись временных рядов, создание карты (map-making) и пикселизацию неба, разделение компонент сигнала, получены данные о распределении анизотропии и поляризации CMB, фоновых компонент (синхротронного и свободно-свободного излучений, излучения пыли), а также рассчитаны их спектры мощности. Представленная карта WMAP ILC (Internal Linear Combination — внутренняя линейная комбинация, построенная по данным, скомбинированным из разных наблюдательных каналов) сглаживалась диаграммой гауссовой формы с разрешением  $1^\circ$ . Весь архив наблю-

\*E-mail: vo@sao.ru

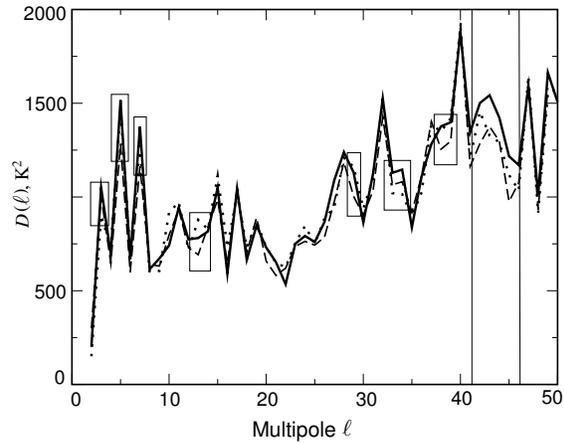
<sup>1</sup><http://www.rssd.esa.int/Planck/>

<sup>2</sup>[http://www.sciops.esa.int/index.php?project=planck&page=Planck\\_Legacy\\_Archive](http://www.sciops.esa.int/index.php?project=planck&page=Planck_Legacy_Archive)

<sup>3</sup><http://lambda.gsfc.nasa.gov>

даемых и обработанных данных доступен и представлен научному сообществу на сайте WMAP.

В отличие от команды WMAP, представившей одну карту CMB, в первом релизе данных Planck были описаны четыре карты реликтового фона. Они были получены в результате применения различных методов разделения компонент [10]. Из этих карт три (SMICA, NILC и SEVEM), построенные по большому диапазону наблюдательных частот, имеют лучшее разрешение (около 5'). Основные методы разделения компонент карт в эксперименте Planck [10]: спектральная подгонка независимых компонент фона в гармоническом пространстве (SMICA), алгоритм внутренней линейной комбинации в пространстве нидлетов (NILC) и метод, основанный на разделении компонент с использованием шаблонов мешающих фоновых излучений (foregrounds), восстановленных из низкочастотных и высокочастотных наблюдательных каналов в пиксельном пространстве (SEVEM). Для сравнительного анализа на основе разных параметров (разрешение, полнота используемых наблюдательных частот, модельные невязки и др.) [10] мы выбрали карту SMICA как содержащую наиболее представительные данные о CMB. Отметим, что данные миссии Planck подтвердили с высокой точностью (для основных космологических параметров с точностью  $1.1\sigma$ ) результаты миссии WMAP. Эти же результаты касаются и углового спектра мощности  $C_\ell$ . Тем не менее угловые спектры мощности на ряде низких гармоник имеют довольно большие различия, которые могут быть обусловлены либо особенностями проведения наблюдений, либо методами разделения компонент. Мы проведем сравнение этих гармоник и попытаемся определить причину различия. Ранее уже было проведено сравнение корреляционных свойств восстановленных карт SMICA, NILC и SEVEM с WMAP ILC 7-го и 9-го годов [11]. Было обнаружено, что карта ILC9 имеет высокую корреляцию с разностным сигналом в восстановленных картах CMB ILC разных лет, и предложено для исследовательских работ использовать для космологического анализа карту ILC7. Кроме того, интерес к низким гармоникам CMB усиливается в связи наблюдаемым эффектом понижения амплитуды бинированного углового спектра мощности на масштабах  $\ell \in [5; 30]$  по отношению к ожидаемому в модели  $\Lambda$ CDM [1, 12]. В данной работе мы рассмотрим и сравним свойства низких гармоник карт SMICA [10], ILC7 [8] и ILC9 [9].



**Рис. 1.** Угловой спектр мощности  $D(\ell) = \ell(\ell + 1) C_\ell / 2\pi$  в диапазоне гармоник  $2 \leq \ell < 50$ . Сплошной линией отмечены данные WMAP7 ILC, пунктиром — WMAP9 ILC, и штрихом — Planck. Прямоугольниками отмечены наиболее различающиеся угловые моменты распределений. Вертикальными линиями на графике показан диапазон мультиполей  $\ell \in [41; 46]$ .

## 2. СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ И НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КАРТЫ

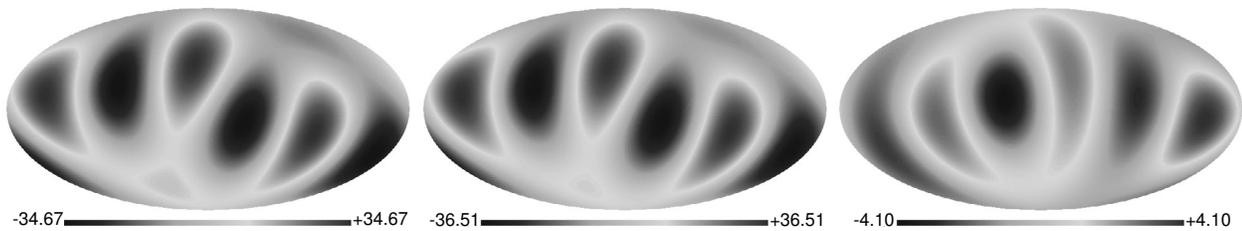
Как уже было отмечено [12], угловой спектр

$$\text{мощности } C_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2, \text{ где } a_{\ell m} \text{ — ко-}$$

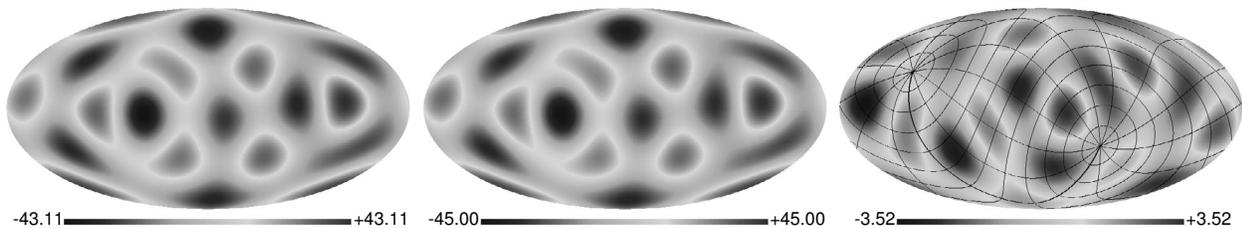
эффициенты при сферических гармониках  $Y_{\ell m}$  в разложении анизотропии температуры  $\Delta T(\theta, \phi)$  по мультипольным моментам  $\ell$  и их модам  $m$ :

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

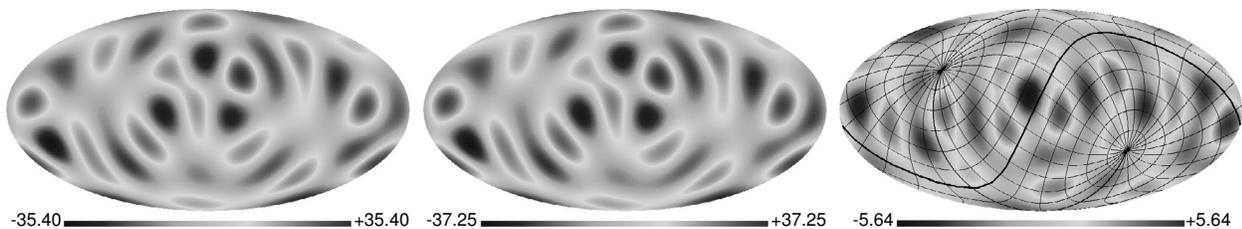
построенный по данным Planck, на ряде низких гармоник имеет меньшие амплитуды, чем аналогичный спектр по данным WMAP. На рис. 1 приведены небинированные угловые спектры мощности CMB, представленные в экспериментах WMAP7, WMAP9 и Planck. Рассмотрим разности карт гармоник, соответствующих наибольшей разности содержащейся в них мощности. Соответствующие диапазоны отмечены на рис. 1 прямоугольниками. Вертикальными линиями на графике показан диапазон мультиполей  $\ell \in [41; 46]$ . На рис. 2, 3, 4 приведены карты разности гармоник  $\ell = 3$ ,  $\ell = 5$  и  $\ell = 7$  соответственно. Среди особенностей этих разностей мультиполей отметим расположение пятен  $\ell = 3$  вдоль плоскости Галактики, чувствительность разности  $\ell = 5$  к экваториальной системе координат (экваториальные полюсы расположены в особых точках — седлах) и прохождение Галактической плоскости через ось  $\ell = 7$  и попадание



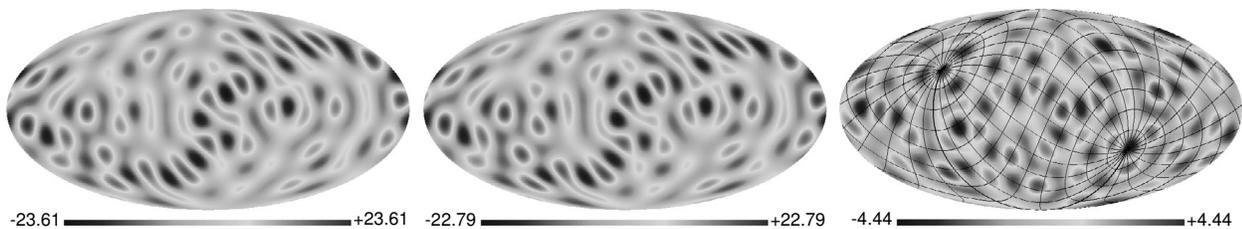
**Рис. 2.** Слева направо: октополь (гармоника  $\ell = 3$ ) карты SMICA по данным Planck, октополь карты ILC 9-го года работы WMAP, карта разности этих сигналов.



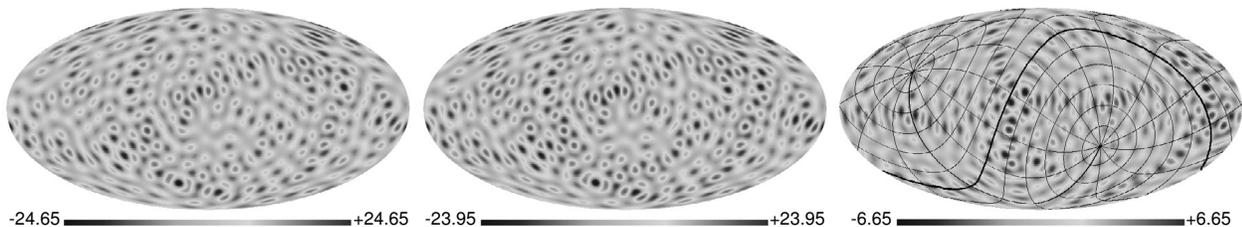
**Рис. 3.** Слева направо: мультиполь  $\ell = 5$  карты SMICA по данным Planck, гармоника  $\ell = 5$  карты ILC 9-го года работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка экваториальной системы координат.



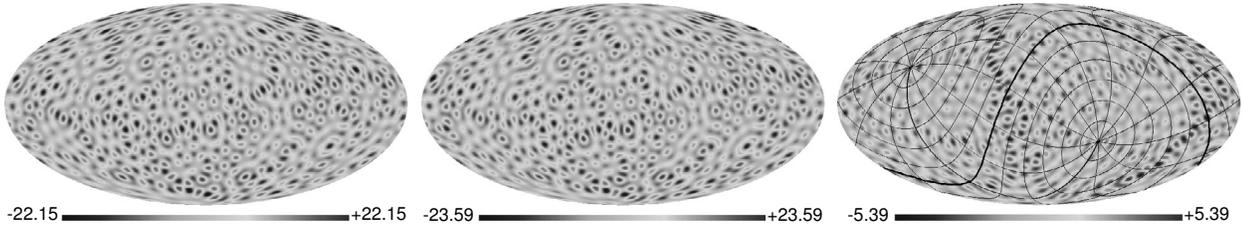
**Рис. 4.** Слева направо: мультиполь  $\ell = 7$  карты SMICA по данным Planck, гармоника  $\ell = 7$  карты ILC 9-го года работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка эллиптической системы координат.



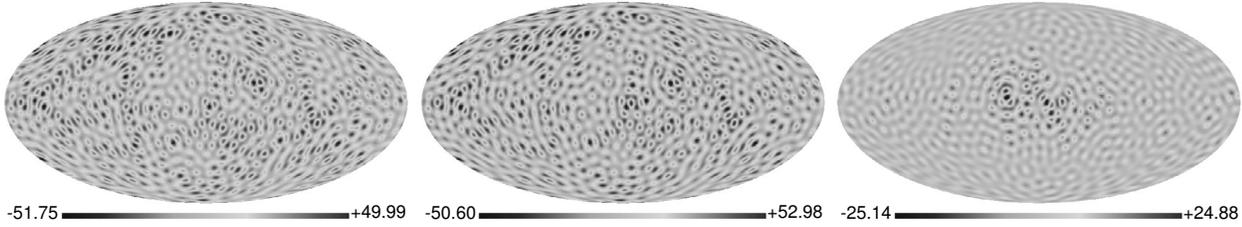
**Рис. 5.** Слева направо: мультиполь  $\ell = 13$  карты SMICA по данным Planck, гармоника  $\ell = 13$  карты ILC 9-го года работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка эллиптической системы координат.



**Рис. 6.** Слева направо: мультиполь  $\ell = 29$  карты SMICA по данным Planck, гармоника  $\ell = 29$  карты ILC 9-го года работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка экваториальной системы координат.



**Рис. 7.** Слева направо: мультиполь  $\ell = 37$  карты SMICA по данным Planck, гармоника  $\ell = 37$  карты ILC 9-го работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка экваториальной системы координат.



**Рис. 8.** Слева направо: суммарный сигнал мультиполей  $\ell \in [41; 46]$  для карты SMICA по данным Planck, гармоники  $\ell = 41-46$  карты ILC 9-го работы WMAP, карта разности этих сигналов.

эклиптических полюсов в седловидные точки на карте  $\ell = 7$ .

Среди гармоник на масштабах менее  $20^\circ$  выделяются мультиполи с номерами  $\ell = 13$  (рис. 5),  $\ell = 29$  (рис. 6),  $\ell = 37$  (рис. 7). Рассмотрим разности сигналов Planck и WMAP9 таким же образом, как и предыдущие мультиполи.

Разность карт мультиполей на масштабе  $\ell = 13$  (угловой размер около  $6^\circ 5'$ ) имеет аномалию, аналогичную той, что у гармоники  $\ell = 7$ : эклиптические полюсы лежат в особых точках — локальных минимуме и максимуме карты. Разность мультиполей на масштабах  $\ell = 29$  (около  $3^\circ$ ) и  $\ell = 37$  (около  $2^\circ 5'$ ) имеет близкую структуру в распределении пятен. Одна из линий сильно контрастных пятен, образованных комбинацией  $m$ -мод мультиполей 29 и 37, совпадает с экваториальной плоскостью. Любопытно отметить, что структура расположения ярких пятен у  $\ell = 29$  и  $\ell = 37$  в правой полусфере соответствует шаблону анизотропной модели Bianchi VII<sub>h</sub>, обсуждавшемуся в работе [13].

В угловом спектре мощности (рис. 1 и 8) выделяется целый диапазон мультиполей,  $\ell \in [41; 46]$ , где амплитуда спектра существенно различается для разных наблюдательных данных.

Разность карт в этом диапазоне гармоник демонстрирует протяженную структуру в области центра Галактики.

Отметим два важных момента при рассмотрении разности карт мультиполей, имеющих большую разность амплитуд в угловом спектре мощности. Во-первых, на всех картах разности имеются особенности, привязанные к галактической, эклиптической или экваториальной (земной) системе коор-

динат. Во-вторых, в нумерации мультиполей, различающихся по амплитуде, можно выделить период  $\Delta\ell = 8$ : отмеченные гармоники, в частности, имеют  $\ell = 5, 13, 29, 37, 45$ .

### 3. СИГНАЛ СМВ ИЗ ДИАПАЗОНА $2 \leq \ell \leq 50$

Рассмотрим теперь сигнал из всего диапазона  $2 \leq \ell \leq 50$ . Граница  $\ell_{\max} = 50$  задана таблицей официально опубликованного на сайте Planck углового спектра мощности. Мы рассчитали фазы  $\psi_{\ell m}$ , используя комплексное представление  $a_{\ell m} = |a_{\ell m}| \exp(i\psi_{\ell m})$  коэффициентов при сферических гармониках в мультипольном разложении, а также нашли средний угол (или среднюю фазу  $\Theta$ ) мультиполя, используя тригонометрические моменты [14]

$$\begin{aligned} \mathbf{Si}(\ell) &= \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \sin(\phi_{\ell, m}), \\ \mathbf{Ci}(\ell) &= \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \cos(\phi_{\ell, m}) \end{aligned} \quad (1)$$

и вычислив средний угол для заданного мультиполя  $\ell$  как арктангенс отношения средних значений синуса и косинуса для мультиполя:

$$\Theta(\ell) = \arctan \left( \frac{\mathbf{Si}(\ell)}{\mathbf{Ci}(\ell)} \right). \quad (2)$$

Средние фазы  $\Theta_{\ell m}$  мультиполей из диапазона  $\ell \in [2; 50]$ . В столбцах приведены соответственно номер мультиполя  $\ell$ , средние фазы гармоник для карт ILC 7-го года (ILC7), ILC 7-го года с примененной маской (ILC7<sub>M</sub>), ILC 9-го года (ILC9 и ILC9<sub>M</sub>), SMICA (SMICA и SM<sub>M</sub>), NILC (NILC и NI<sub>M</sub>), SEVEM (SEVEM и SE<sub>M</sub>)

$\ell$	ILC7	ILC7 <sub>M</sub>	ILC9	ILC9 <sub>M</sub>	SMICA	SM <sub>M</sub>	NILC	NI <sub>M</sub>	SEVEM	SE <sub>M</sub>
2	2.870	3.178	2.950	3.224	3.038	3.587	3.167	3.691	3.199	3.640
3	1.843	1.700	1.866	1.726	1.899	1.680	1.868	1.658	1.816	1.554
4	4.946	5.517	4.899	5.528	5.136	5.583	5.082	5.593	5.168	5.598
5	1.190	1.162	1.216	1.173	1.186	1.131	1.188	1.133	1.198	1.121
6	0.677	0.080	0.681	0.044	0.741	0.280	0.812	0.308	0.961	0.349
7	2.642	3.135	2.637	2.880	2.638	2.635	2.615	2.629	2.420	2.449
8	0.741	0.217	0.786	0.224	0.630	0.181	0.649	0.165	0.448	0.137
9	1.172	2.155	1.196	2.151	1.364	2.178	1.739	2.193	1.865	2.217
10	4.660	5.406	4.595	5.455	4.900	5.457	5.111	5.456	4.972	5.427
11	0.251	6.278	0.254	6.263	0.423	0.057	0.283	0.059	0.156	0.047
12	5.750	5.986	5.931	6.034	5.703	5.969	5.557	5.939	5.689	5.850
13	5.134	5.400	5.167	5.458	5.123	5.366	5.229	5.379	5.501	5.433
14	2.477	2.607	2.399	2.679	2.879	1.393	3.351	1.069	3.508	0.811
15	0.757	5.378	0.808	5.027	0.717	5.281	0.386	5.246	0.332	5.092
16	3.044	2.629	3.048	2.627	3.142	2.677	3.250	2.688	3.249	2.707
17	5.839	0.799	5.936	1.000	0.629	0.781	2.202	0.738	1.803	0.602
18	2.971	2.457	2.880	2.451	2.726	2.465	2.668	2.464	2.963	2.491
19	2.691	0.838	2.240	0.737	1.641	0.779	0.308	0.794	6.029	0.807
20	1.098	1.732	1.114	1.692	1.224	1.851	1.340	1.844	1.411	1.860
21	3.669	0.299	3.205	0.557	1.647	0.566	2.071	0.608	1.944	0.618
22	1.668	1.443	1.555	1.394	1.600	1.323	1.479	1.314	1.713	1.263
23	4.332	3.743	4.368	3.879	3.932	3.526	4.136	3.597	3.938	3.517
24	4.347	1.670	4.156	1.766	3.263	2.104	2.636	2.085	2.316	2.166
25	2.387	1.802	2.335	1.937	1.630	1.525	2.215	1.482	1.394	1.501
26	0.641	0.025	0.633	0.002	0.277	6.253	0.443	6.264	0.432	0.016
27	0.260	0.768	0.243	0.785	0.205	0.806	6.257	0.804	0.111	0.770
28	2.198	2.112	2.207	2.071	2.652	2.234	2.866	2.248	2.738	2.321
29	2.157	1.744	2.155	1.768	2.087	1.638	2.108	1.642	1.970	1.700
30	4.313	5.483	4.920	5.610	5.509	5.150	0.491	5.170	0.684	5.134
31	2.913	3.034	2.806	3.188	2.867	2.922	2.784	2.926	2.659	2.963
32	3.494	3.205	3.194	2.545	2.873	2.553	2.545	2.453	2.530	2.575
33	4.622	3.822	4.499	3.799	3.868	3.842	3.555	3.856	4.040	3.871
34	5.185	5.934	5.185	6.040	5.197	6.278	5.457	0.077	5.107	6.258

Таблица. (Продолжение)

$\ell$	ILC7	ILC7 <sub>M</sub>	ILC9	ILC9 <sub>M</sub>	SMICA	SM <sub>M</sub>	NILC	NI <sub>M</sub>	SEVEM	SE <sub>M</sub>
35	4.799	5.579	4.828	5.596	4.752	5.804	5.441	5.820	5.609	5.808
36	0.078	5.654	0.906	5.690	2.309	5.334	2.123	5.330	2.226	4.485
37	0.520	0.064	0.446	0.055	0.614	0.131	0.550	0.129	0.773	0.092
38	2.282	2.880	2.284	2.872	2.165	2.839	2.177	2.791	2.349	2.849
39	2.590	4.602	2.660	4.553	2.588	4.134	2.158	4.035	3.101	4.033
40	5.686	5.504	5.829	5.840	5.694	6.175	6.114	6.184	6.153	6.207
41	3.443	2.376	3.560	1.789	4.606	1.949	5.007	1.950	4.276	2.043
42	1.202	1.547	1.281	1.587	1.636	1.407	1.659	1.362	1.754	1.388
43	0.146	5.667	0.217	5.657	0.414	5.869	0.304	5.881	0.251	5.899
44	3.625	4.257	3.636	4.304	4.298	4.239	4.309	4.236	4.317	4.316
45	3.881	2.842	3.862	2.931	3.792	3.218	3.644	3.233	3.706	3.236
46	1.085	4.707	1.153	5.571	1.152	4.570	0.471	4.454	1.174	3.604
47	0.819	6.001	0.777	5.973	0.605	6.064	0.587	6.079	0.705	6.022
48	5.126	5.800	4.979	5.906	6.003	6.068	5.450	6.039	5.449	5.945
49	4.799	4.986	4.887	5.048	4.992	4.557	5.029	4.541	5.165	4.529
50	0.459	0.286	0.439	0.230	0.371	0.234	0.367	0.207	0.369	0.158

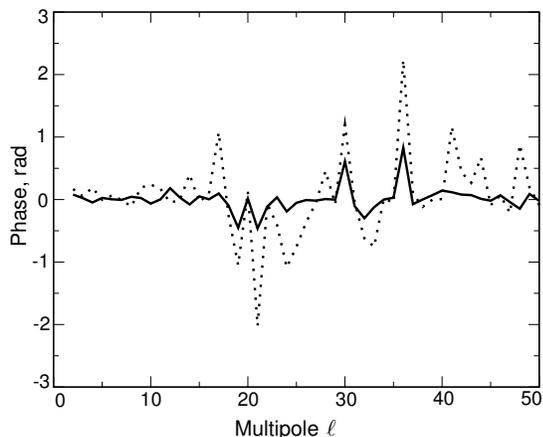
Вычисления были проведены для карт WMAP ILC7 и ILC9, а также для всех карт SMICA из архива Planck: SMICA, NILC, SEVEM. Кроме того, для всех карт также рассчитаны средние фазы с предваряющим гармоническое разложение наложением экранирующей маски KQ85, подготовленной командой WMAP. Все средние фазы мультиполей из диапазона  $\ell \in [2; 50]$  приведены в таблице.

На рис. 9 показаны разности средних фаз  $\Theta(\ell)$  карт ILC WMAP 9-го года и ILC WMAP 7-го года наблюдений, а также карт Planck SMICA и ILC WMAP7. Здесь наиболее отличающиеся средние фазы, когда разность  $\Delta\Phi > 1$ , у гармоник  $\ell = 17, 19, 21, 24, 30, 36, 41$  для карт SMICA и ILC7.

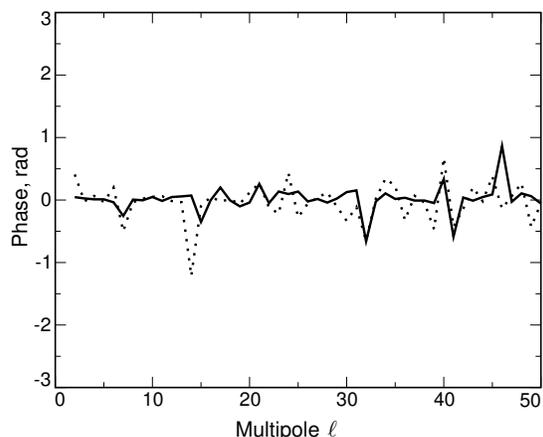
На рис. 10 показаны разности средних фаз  $\Theta(\ell)$  карт ILC WMAP 9-го года и ILC WMAP 7-го года наблюдений, а также карт Planck SMICA и ILC WMAP7. На все карты перед вычислением фаз наложена маска KQ85 из архива WMAP. Исходные карты и карты с наложенными масками показаны на рис. 11. Наиболее отличающиеся средние фазы у мультиполя  $\ell = 14$  для карт SMICA и ILC7. Отметим, что маска экранирует плоскость Галактики и сильные радиоисточники. Величина разности средних фаз значительно уменьшается.

Но наложение маски приводит и к артефактам, таким, например, как появление отскока на  $\ell = 14$ .

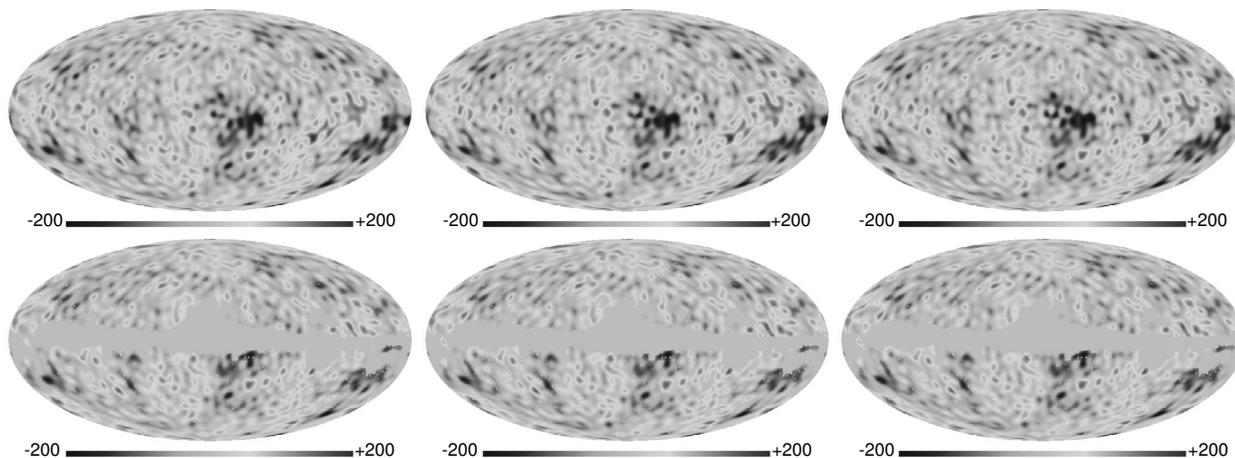
Разность средних фаз низких мультиполей карт, для которых была выполнена процедура наложения маски, и карт без наложения маски позволяет разделить низкие гармоники на две группы. Одна из них испытывает наибольшие искажения при экранировании части карты. Другая оказывается слабо чувствительной к этой операции, т.е. гармоники из этой группы сохраняют свои фазовые свойства, например, координаты ярких пятен. Это означает, что их свойства в основном определяются сигналом вне галактической плоскости. На рис. 12 можно увидеть разность средних фаз карт без наложения маски и с наложением маски. График построен для данных ILC WMAP9, а также Planck SMICA. На рисунке выделяются четыре диапазона мультиполей  $\ell$ : [2; 13], [14; 24], [25; 34] и [35; 48]. Мультиполи из диапазонов [2; 13] и [25; 35] имеют значительно меньшую дисперсию фаз, чем из двух других отрезков. Обращает также на себя внимание тот факт, что колебания разности фаз на отрезке  $\ell \in [14; 24]$  у карты SMICA более чем в два раза ниже, чем у карты ILC9. В то же время из диапазона  $\ell \in [35; 48]$  фазовые данные SMICA имеют в 1.5 раза большую положительную амплитуду аналогичных величин ILC9.



**Рис. 9.** Разность средних фаз  $\Theta(\ell)$  карт ILC WMAP 9-го года и ILC WMAP 7-го года наблюдений (сплошная линия), а также карт Planck SMICA и ILC WMAP7 (пунктир). Маска на карты не накладывалась.



**Рис. 10.** Разность средних фаз  $\Theta(\ell)$  карт ILC WMAP 9-го года и ILC WMAP 7-го года наблюдений (сплошная линия), а также карт Planck SMICA и ILC WMAP7. На все карты перед вычислением фаз наложена маска KQ85.



**Рис. 11.** Слева направо: карты сигнала СМВ из диапазона  $\ell \in [2; 50]$  для методов SMICA (Planck), ILC7 и ILC9 (WMAP). Вверху: карты СМВ без наложения маски. Внизу: карты СМВ с наложенной маской KQ85.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы рассмотрели угловые спектры мощности и фазовые характеристики карт СМВ двух независимых экспериментов: WMAP и Planck. Спектры мощности, построенные по данным этих обсерваторий, имеют наибольшие различия при мультипольных моментах  $\ell = 5, 7, 13, 29, 37, 41-46$ . Мы исследовали соответствующие карты ILC WMAP и SMICA WMAP. Как правило, на этих мультиполях разность карт оказывается привязанной к одной или сразу к двум из трех систем координат: галактической, эклиптической и экваториальной. Такая чувствительность разностного сигнала к выбору системы отсчета естественным образом объясняется систематическими эффектами (методикой проведения наблюдений и обработки данных)

либо трудноучитываемыми физическими явлениями. Отметим, что выделенные в спектре мощности мультиполи, за исключением диапазона  $\ell \in [41; 46]$ , имеют сигнал, слабо чувствительный к наложению экранирующей маски (рис. 12).

Самые сильные эффекты при анализе данных вносит наша Галактика, излучение которой доходит до галактических широт  $|b| > 40^\circ$  [15]. Особенность влияния галактического сигнала состоит в том, что даже экранирование плоскости Галактики все равно оставляет сигнал за ее пределами, и при мультипольном разложении он проникает в карты гармоник в область центральной плоскости. Фазовый анализ показывает, что в диапазоне самых низких гармоник ( $\ell \in [2; 13]$ ) влияние Галактики удается учесть сравнительно хорошо

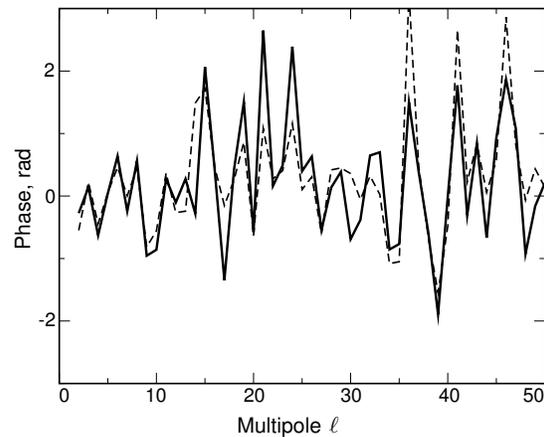
(рис. 12), а в области  $\ell \in [14; 24]$ , соответствующей типичным угловым размерам плоскости Галактики ( $4\text{--}10^\circ$ ), сигнал сохраняется. В этом диапазоне угловых масштабов вклад излучения Галактики в карту СМВ значительно понижен для данных Planck по сравнению с данными WMAP. Это факт может объясняться различием в анализе данных, а именно в использовании высокочастотных карт Planck (выше 100 ГГц), которые отсутствовали в эксперименте WMAP. Тем не менее на обертоновых гармониках (в интервале, смещенном по пространственной частоте в два раза:  $\ell \in [35; 48]$ ) влияние Галактики на немаскируемую карту Planck становится существенным и превышает аналогичный вклад сигнала у WMAP. Этот эффект наблюдается в картах, соответствующих наибольшей разности в спектре мощности из диапазона  $\ell \in [41; 45]$  (см. рис. 8).

Разность гармоник для мультипольных моментов  $\ell = 7, 13$  (угловые масштабы соответственно около  $12^\circ$  и  $6^\circ$ ) чувствительна к эклиптической системе координат, которая выделяется и методически, и физически благодаря нескольким эффектам, включающим:

- (1) вращение спутников вокруг точки L2, лежащей в эклиптической плоскости;
- (2) излучение пыли, пояса Койпера [16] и других объектов Солнечной системы, лежащих в эклиптической плоскости;
- (3) лежащее в плоскости эклиптики скопление галактик в Деве, которое оказывает влияние на суммарный вектор движения Галактики.

Отметим, что ранее [17, 18] мы уже обсуждали гармонику  $\ell = 6$  карты СМВ WMAP и выделенность для нее эклиптической и галактической систем координат. Гармоника  $\ell = 6$  соответствует характерному угловому масштабу примерно  $13.5^\circ$  и совместно с  $\ell = 7$  дает обертоновый размер для  $\ell = 13$ . Таким образом, различие в угловом спектре мощности для гармоник  $\ell = 7, 13$  может быть вызвано одной причиной. Сравнительно небольшие угловые масштабы эффекта отвергают объяснение влиянием скопления в Деве, но и не позволяют выбрать между эффектом систематики или неучтенным излучением внутри Солнечной системы.

Представляется интересным, что разность карт чувствительна к экваториальной системе координат, наблюдаемой для мультипольных моментов  $\ell = 5, 29, 37$ . Влияние экваториальной системы на данные WMAP мы уже обсуждали ранее в [19]. Отметим здесь, что наряду с возможной модуляцией солнечного ветра, проходящего через точку L2, магнитным полем Земли, «знающим» об экваториальной системе, возможно и другое объяснение:



**Рис. 12.** Разность средних фаз  $\Theta(\ell)$  карт ILC WMAP 9-го года без маски и ILC9 с наложенной маской KQ85 (сплошная линия), а также карт Planck SMICA без маски и с маской KQ85 (пунктир).

эффект вызван излучением Земли, попадающим в далекие боковые лепестки антенны космической обсерватории. В этом случае неравномерность излучения микроволнового фона Земли может отразиться в записи временных рядов телескопа.

Обнаруженная периодичность  $\Delta\ell = 8$  в нечетных мультипольных моментах у невязок между угловыми спектрами мощности WMAP и Planck отсылает к обсуждавшемуся ранее эффекту модуляции сигнала спектра WMAP с периодом  $\Delta\ell = 4$  [20], который, по-видимому, обусловлен вкладом галактических компонент излучения.

Таким образом, можно сказать, что различие в угловом спектре мощности сигнала СМВ WMAP и Planck на низких гармониках, чувствительное к трем небесным системам координат, вызвано, в первую очередь, различием наблюдательных данных (разный набор наблюдательных частотных полос) и отличающимся подходом в их анализе. Причем эффекты систематики оказывают значительное влияние на обсуждаемую разность спектров. Эти же эффекты могут быть ответственны и за аномальное распределение сигнала в полусферах, которое наблюдается как различие мощности в северном и южном галактическом и эклиптическом полушариях [13, 21–23]. Отметим, что аномальная статистическая анизотропия, признаком которой является неоднородное распределение сигнала между северным и южным полушариями, существует и в экваториальной системе координат. Заметим также, что часть проблем некоторых низкочастотных аномалий сигнала СМВ [24] удастся снять в модифицированных подходах к процедуре разделения компонент [25], хотя другая часть проявлений статистической анизотропии, таких как отношение мощности сигнала в северном и южном

полушариях, все равно сохраняется. Возможные объяснения этой аномалии — анизотропное расширение Вселенной [26, 27] или просто случайное выпадение подобной реализации распределения фона в нашей Вселенной — остаются под вопросом, причем не только теоретическим, но и практическим, из-за сложности проверки. В этом плане поиск объяснения аномалии в рамках систематики представляется более перспективным. Также необходимо сказать несколько слов и о возможном неучете всех систематических эффектов в данных Planck. В работе [28] отмечается, что исключение канала 217 ГГц из анализа данных и восстановления СМВ, но использование оставшихся восьми наблюдательных каналов Planck, существенно сближает космологические оценки экспериментов WMAP и Planck. Наша проверка карты на 217 МГц показала, что в опубликованных данных Planck сигнал на 217 МГц имеет самый значительный коррелированный вклад в результирующую карту СМВ вне плоскости Галактики ( $|b| > 20^\circ$ ). Причем сигнал СМВ близок к сигналу наблюдательного канала на разных угловых масштабах (см., например, изображения отдельных площадок на <http://cmb.sao.ru> [29]). По исследованию внутренних корреляций карт Planck готовится отдельная статья.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен А. Г. Дорошкевичу за полезные обсуждения в ходе подготовки данной работы. Автор также выражает 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 (<http://www.glesp.nbi.dk>) [30–32] для анализа протяженного излучения на сфере. Исследования по данной теме были поддержаны грантом РФФИ № 13-02-00027.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results,” arXiv:1303.5062.
2. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **192**, 17 (2011).
3. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **148**, 1 (2003).
4. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **148**, 97 (2003).
5. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **148**, 175 (2003).
6. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170**, 288 (2007).
7. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **180**, 225 (2009).
8. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **192**, 14 (2011).
9. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **208**, 20 (2013).
10. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 results. XII. Component separation,” arXiv:1303.5072.
11. A. Frejsel, M. Hansen, and H. Liu, *J. Cosmology and Astroparticle Phys.*, No. 06, id. 005 (2013).
12. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 results. XV. CMB power spectra and likelihood,” arXiv:1303.5075.
13. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 results. XXIII. Isotropy and Statistics of the CMB,” *Astron. and Astrophys.* (in press); arXiv:1303.5083.
14. M. Hansen, A. M. Frejsel, J. Kim, et al., *Phys. Rev. D* **83**, 103508 (2011).
15. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), “Planck 2013 results. XIII. Galactic CO emission,” arXiv:1303.5073.
16. M. Hansen, J. Kim, A. M. Frejsel, et al., *J. Cosmology and Astroparticle Phys.*, No. 10, id. 059 (2012).
17. O. V. Verkhodanov and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 1 (2012).
18. O. V. Verkhodanov, T. V. Keshelava, and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 245 (2012).
19. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S. V. Karpov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 238 (2010).
20. P. D. Naselsky and I. D. Novikov, *Int. J. Modern Phys. D* **14**, 1769 (2005).
21. H. K. Eriksen, I. D. Novikov, P. B. Lilje, et al., *Astrophys. J.* **612**, 64 (2004).
22. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **65**, 390 (2010).
23. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 345 (2011).
24. O. B. Верходанов, *УФН* **182**, 1177 (2012).
25. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, *Phys. Rev. D* **83**, 3002 (2011).
26. M. Demiański and A. Doroshkevich, *Phys. Rev. D* **75**, 123517 (2007).
27. T. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., *Astrophys. J.* **629**, L1 (2005).
28. D. Spergel, R. Flauger, and R. Hlozek, arXiv:1312.3313 (2013).
29. O. V. Verkhodanov, Ya. V. Naiden, V. N. Chernenkov, and N. V. Verkhodanova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 113 (2014).
30. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Modern Phys. D* **14**, 275 (2003).
31. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
32. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Intern. J. Mod. Phys. D* **20**, 1053 (2011).

## Comparison of Low Harmonics Spectra and Maps According to the WMAP and Planck Space Missions

O. V. Verkhodanov

We present a comparison of the angular power spectra and maps represented by the WMAP and Planck mission teams. The spectra are compared in the multipole range ( $2 \leq \ell \leq 50$ ). The  $\ell = 5, 7, 13, 29, 37, 41-46$  harmonics have a discrepancy in the angular power spectra. The maps of the microwave background and their phase characteristics are studied at these spatial frequencies. We show that the discrepancy of the spectra is due to a different account of the systematics linked with the Galaxy, the ecliptic, and possibly with the Earth. These effects, leading to a statistical anisotropy, may be responsible for the observed anomalies in both experiments at low harmonics.

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