

УДК 524.827-355

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПИКОВ ФОНОВОГО СИГНАЛА НА СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ МУЛЬТИПОЛЯХ

© 2019 В. В. Пушкарев^{1*}, Е. К. Майорова^{2**}, О. В. Верходанов^{2***}

¹Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 18 февраля 2019 года; после доработки 26 июля 2019 года; принята к публикации 26 июля 2019 года

В работе рассматриваются спектральные свойства неоднородностей космического микроволнового фона. Исследуются спектры неоднородностей в диапазоне частот от 30 до 217 ГГц по данным многочастотных карт космической миссии Planck со сглаживанием на разных угловых размерах. По данным зависимости термодинамической температуры от частоты показано, что карта на частоте 70 ГГц имеет распределение сигнала, отличающееся от данных на других частотах в зависимости от окна сглаживания. На 70 ГГц в спектре присутствует пик, наиболее сильно проявляющийся на картах без сглаживания. В спектрах неоднородностей, представленных зависимостью плотности потока от частоты, для данных на высоких мультиполях ($\ell > 200$, $\theta < 30'$) обнаружено отличное от низких мультиполей ($\ell < 200$) поведение сигнала, которое демонстрирует монотонно растущий спектр с увеличением частоты от 30 до 217 ГГц.

Ключевые слова: *реликтовое излучение — космология: наблюдения*

1. ВВЕДЕНИЕ

Публикация данных микроволнового диапазона по протяженному излучению неба на полной сфере в эксперименте Европейского космического агентства (ESA) Planck¹ [1] предоставила новые возможности для исследования компонент фонового излучения и радиоисточников в области миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. 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 порядка 5'. Архив миссии Planck (Planck Legacy Archive, PLA²) содержит карты компонент излучения трех релизов. Он дает возможность исследовать микроволновой сигнал с различным разрешением, что представляет интерес при исследовании происхождения вто-

ричной анизотропии температуры, дающей вклад в том числе и в распределение CMB.

Отметим компоненты микроволнового фонового излучения, которые используются в стандартных процедурах разделения и выделения сигнала реликтового излучения [2, 3]. Они же могут дать полезную информацию и в наших исследованиях. Стандартные протяженные фоновые компоненты в микроволновом диапазоне по данным Planck включают, согласно [2], синхротронное излучение, свободно-свободное, тепловое излучение пыли и излучение вращающихся пылинок, а также излучение в линии CO.

Диффузное синхротронное излучение генерируется релятивистскими электронами, двигающимися по спирали вдоль силовых линий магнитного поля Галактики. Излучение сильно поляризовано. Доля поляризованной компоненты доходит примерно до 75% [2]. Свободно-свободное (или тормозное) излучение вызывается столкновениями электронов и ионов и, следовательно, имеет легко описываемый частотный спектр. На низких частотах свободно-свободное излучение существенно дополняется синхротронным, но из-за более плоского спектра оно восстанавливается по данным, полученным на HFI, с высоким отношением S/N . На частотах выше 100 ГГц среди радиационных

*E-mail: pushkarev.vv14@physics.msu.ru

**E-mail: len@sao.ru

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

¹https://www.esa.int/Our_Activities/Space/_Science/Planck

²<http://pla.esac.esa.int/pla/#home>

механизмов доминирует тепловое излучение пыли [4–7]. Основная частота определяется температурой пылинок, и поэтому меняется в зависимости от их типа и окружения. В идеальном случае тепловое излучение пыли на частотах миссии может быть описано как чернотельное [6, 8].

При переходе к частотам выше 857 ГГц (к диапазону частот эксперимента COBE-DIRBE) физические свойства пыли становятся более сложными, как и инструментальная систематика. Этим объясняется ограничение анализа спектра пыли в диапазоне до 857 ГГц. Вращающиеся пылинки имеют ненулевой электрический дипольный момент; такое вращение обязательно приводит к микроволновому излучению [9]. Прогресс в методах наблюдений [10–13] позволил выделить эту компоненту излучения и описать ее соответствующим спектральным шаблоном, вычисляемым для холодной нейтральной среды [14, 15]. Излучение в линиях CO и 94/100 ГГц по данным Planck [16] определено на частотах миссии 100, 217 и 353 ГГц, причем для переходов CO J = 1 → 0, CO J = 2 → 1 и CO J = 3 → 2 построены специальные карты.

Проблема разделения протяженных фоновых компонент может отражаться на оценках плотности потока слабых радиисточников, присутствующих как на исходных картах наблюдений на разных частотах, так и на картах СМВ.

Исследование спектра неоднородностей различного размера позволит оценить влияние остаточного вклада фоновых галактических компонент. Отметим, что, согласно проведенным ранее измерениям, континуальные спектры различных радиисточников в микроволновом диапазоне длин волн [17–21] напоминают спектр излучения пыли, демонстрирующий рост мощности излучения от миллиметрового диапазона к субмиллиметровому диапазону длин волн. Кроме того, подобные спектры можно увидеть у радиисточников каталога Planck [22]. Этот факт можно объяснить либо переходом в этом диапазоне длин волн от излучения радиисточника к излучению содержащей пыль родительской галактики, либо остаточным сигналом фоновых компонент в области радиисточника. Во втором случае ожидается подобный эффект и для неоднородностей реликтового фона. В данной работе мы исследуем сигнал на разных частотах в областях фоновых положительных пиков. Карты фоновых компонент на разных частотах представляют собой разность распределения сигнала наблюдательных каналов и карты СМВ.

Дополнительный интерес представляет и электромагнитный спектр неоднородностей, имеющих как на карте микроволнового фона, так и на многочастотных картах наблюдательных каналов на высоких галактических широтах. Такие данные помогут проанализировать спектральные свойства

пятен и проверить, насколько (с учетом возможных причин вторичной анизотропии СМВ) эти неоднородности являются первичными. Если горячие пятна, соответствующие неоднородностям СМВ и наблюдаемые на многочастотных каналах, имеют отличный от теплового электромагнитный спектр, то это будет означать, что они либо содержат вклад других фоновых компонент, либо часть из них может быть результатом взаимодействия с объектами в доэпоху комбинационную эпоху (например, первичными черными дырами, если такие были). Среди мешающих потенциальных фоновых компонент излучения, которые могут привести к подъему спектра в красной области, как показано в работах [17–21], могут быть и слабые источники, и пыль Галактики. Здесь мы рассмотрим «популяцию» пятен разного размера в виде среднего объекта на разных угловых масштабах, чтобы исследовать возможное проявление эффекта в зависимости от их размера.

В данной работе для изучения неоднородности реликтового излучения мы выбрали различные площадки на высоких галактических широтах $|b| > 20^\circ$, где ожидается меньший вклад галактических фоновых компонент.

2. ВЫБОР ПЛОЩАДОК

При выборе положения площадок, в которых проводился анализ пятен разного размера, мы руководствовались следующими условиями:

- желательны высокие галактические широты $|b| > 25^\circ$;
- наличие контрастных неоднородностей в выбранном частотном канале, соответствующих неоднородностям СМВ, то есть применение для анализа данных фактически наблюдаемых областей СМВ на многочастотных картах;
- размеры области неба более $5^\circ \times 5^\circ$; размеры выбранных зон в данной работе — $20^\circ \times 20^\circ$.

Отобранные для анализа площадки неба показаны на рис. 1, координаты их центров приведены в таблице 1.

3. КАЛИБРОВКА

Для построения спектров $S_\theta(\nu)^3$ отдельных неоднородностей карт мы использовали подход, аналогичный примененному в работах [17, 18].

³ S_θ — интегральная плотность потока, принимаемая с площадки углового размера θ , ν — частота, измерения на которой использовались для построения соответствующей карты на наблюдательном канале Planck

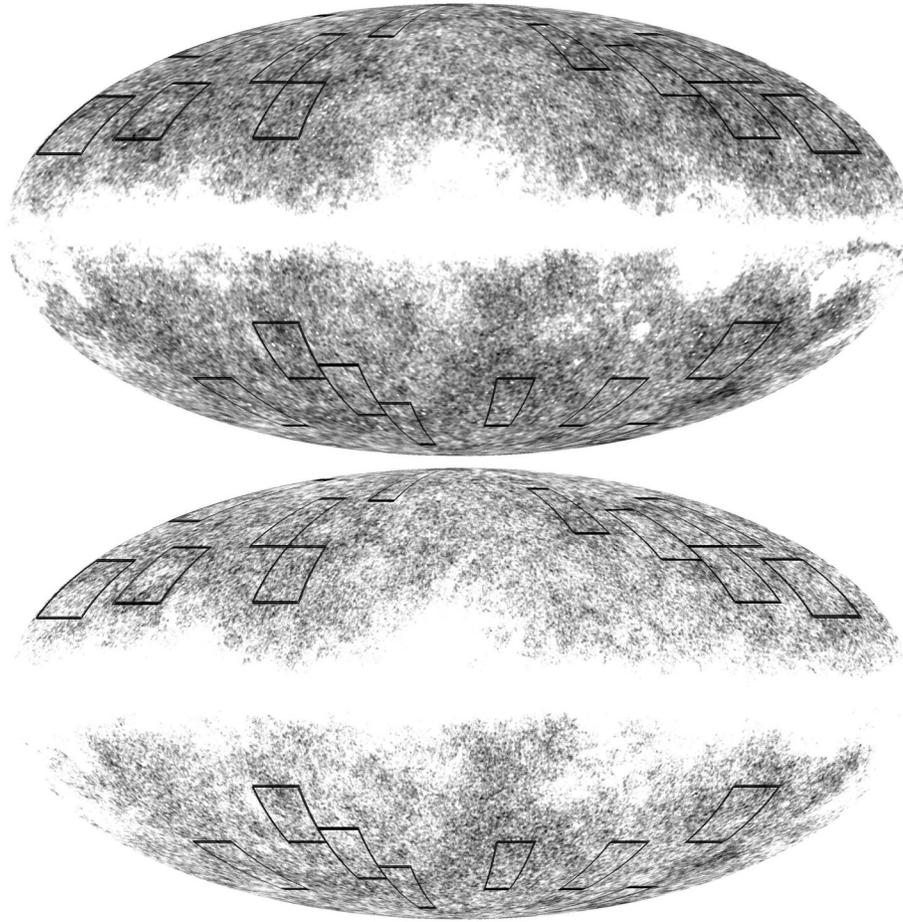


Рис. 1. Расположение анализируемых областей (выделено сплошными черными линиями) размером $20^\circ \times 20^\circ$ на картах излучения, построенных по результатам наблюдений космической миссии Planck, на частотах 30 ГГц (вверху) и 217 ГГц (внизу).

Таблица 1. Галактические координаты (b, l) центров площадок размером $20^\circ \times 20^\circ$, отобранных для анализа свойств пятен

№	b , deg	l , deg	№	b , deg	l , deg	№	b , deg	l , deg
1	35	170	8	-40	80	14	-79	220
2	40	140	9	60	100	15	40	230
3	40	80	10	-40	230	16	-60	270
4	55	250	11	-70	40	17	70	170
5	65	285	12	60	210	18	79	60
6	-60	330	13	-60	130	19	35	200
7	-55	60						

каталога Planck⁴ мы построили калибровочные зависимости плотности потока от интенсивности (термодинамической температуры), определенной по многочастотным картам микроволнового излучения.

Для оценки плотностей потоков в областях локализованных неоднородностей, рассматриваемых как источники, на наблюдательных частотах Planck из представленного каталога [22] выбирались яркие непротяженные объекты. Их измеренные в миссии Planck плотности потока использовались для калибровки перевода амплитуды температуры на многочастотных картах Planck в плотность потока. Для поиска источников и фотометрического измерения сигнала в данных Planck применялась программа Source Extractor⁵ (SExtractor) [23]. Предварительно из архивных карт Planck с помощью процедуры `mapcut` па-

По данным измерений температуры на многочастотных картах Planck для радиоисточников

⁴Список объектов доступен по ссылке http://sed.sao.ru/~vo/pub_tab/tab_ABUL2019N4_src_calib.html

⁵<http://www.astromatic.net/software/sextractor>

кета GLESP⁶ [24–26] в окрестности радиоисточников выделялись области размером $2^\circ \times 2^\circ$ на частотах 30 и 44 ГГц и $30' \times 30'$ — на частотах 70–857 ГГц. Данные для дальнейшего анализа в выделенных площадках сохранялись в виде файлов в формате FITS Basic [27]. Выбранные области анализировались пакетом SExtractor: интегральная яркость объектов определялась изофото-скорректированным (ISOCOR) методом с предварительным удалением тренда, рассчитываемого процедурой пакета. Из соотношения между плотностью потока S радиоисточников каталога Planck и соответствующей измеренной яркостью на картах миссии были построены калибровочные кривые $S_{\text{iso}}(T)$ и $S_{\text{aut}}(T)$, которые в дальнейшем применялись при обработке исследуемых объектов. Количество источников, используемых для построения калибровочных кривых на разных частотах, доходило до нескольких десятков, а плотности потоков калибраторов лежали в диапазоне приблизительно от 0.5 Ян до десятков Ян. Зависимость, построенная изофото-скорректированным методом, показана на рис. 2. Прямая линия на рисунке отражает результаты линейной аппроксимации. Аналитический вид аппроксимационных зависимостей приведен в таблице 2: в первом столбце — частота канала ν в ГГц, во втором — угловой размер сглаживания θ (если процедура была выполнена без сглаживания, то $\theta = 0$), в третьем — вид линейной регрессионной зависимости плотности потока от температуры на карте миссии Planck, определяемой с помощью процедуры SExtractor, где, как видно, коэффициент a — тангенс угла наклона регрессионной прямой, отличается довольно значительно для разных окон сглаживания, что объясняется эффектом интегрирования неоднородностей в окрестности максимума при сглаживании, σ_a — относительная ошибка определения тангенса угла наклона коэффициента аппроксимационной прямой, N_s — объем выборки источников из каталога. В правой части калибровочных диаграмм для мощных радиоисточников наблюдается разброс точек, который может быть вызван какими-либо нелинейными эффектами, например, неточной оценкой фона в окрестности яркого объекта, либо протяженностью самого источника. Списки используемых для калибровки объектов каталога Planck приведены в Приложении.

Для оценки и построения электромагнитного спектра фонового излучения пятен различного размера в шкале плотностей потоков мы привели неоднородности фона, наблюдаемые на разночастотных картах Planck, к одному масштабу. Для этого использовалось сглаживание гауссианой соответствующего размера. Процедура сглаживания

Таблица 2. Параметры калибровочных кривых

ν , ГГц	θ , arcmin	S , Ян	σ_a , %	N_s
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
30	0	$3.3093T + 0.0897$	3	200
30	5	$3.2165T + 0.1090$	3	200
30	35	$190.2627T + 0.2905$	3	100
30	60	$323.4203T + 0.1216$	5	100
44	0	$4.7156T + 0.4843$	4	100
44	5	$5.8174T + 0.3454$	4	100
44	35	$402.4858T + 0.5232$	6	50
44	60	$650.6276T + 0.7825$	13	30
70	0	$12.4071T + 0.1766$	4	100
70	5	$13.0744T + 0.1893$	4	100
70	35	$573.8741T + 0.1928$	9	35
70	60	$1507.0105T + 0.8544$	16	12
100	0	$20.5963T + 0.0809$	1	250
100	5	$25.2404T + 0.1008$	1	200
100	60	$2738.5083T - 0.8365$	8	25
100	35	$907.5971T - 0.8944$	4	50
143	0	$30.5618T + 0.0293$	1.5	250
143	5	$54.3722T + 0.0085$	3	200
143	35	$1224.9972T - 0.7364$	6	34
143	60	$2910.8894T - 0.6412$	30	22
217	0	$35.7290T + 0.0489$	1.5	350
217	5	$114.1688T - 0.0503$	2	250
217	35	$1482.8214T - 1.3392$	6	48
217	60	$1174.8671T - 0.1534$	15	19

была проведена в гармонической области с помощью утилиты `rsalm` пакета GLESP [24]. Для каждой сглаженной карты независимо проводилась привязка по плотности потока с использованием источников каталога Planck, описанным выше методом. Сглаженные карты с радиоисточниками таким же образом использовались для построения калибровочных кривых и оценки плотностей потоков. Калибровочные кривые, построенные для различных углов сглаживания, показаны на рис. 3–9.

⁶<http://www.glesp.nbi.dk>

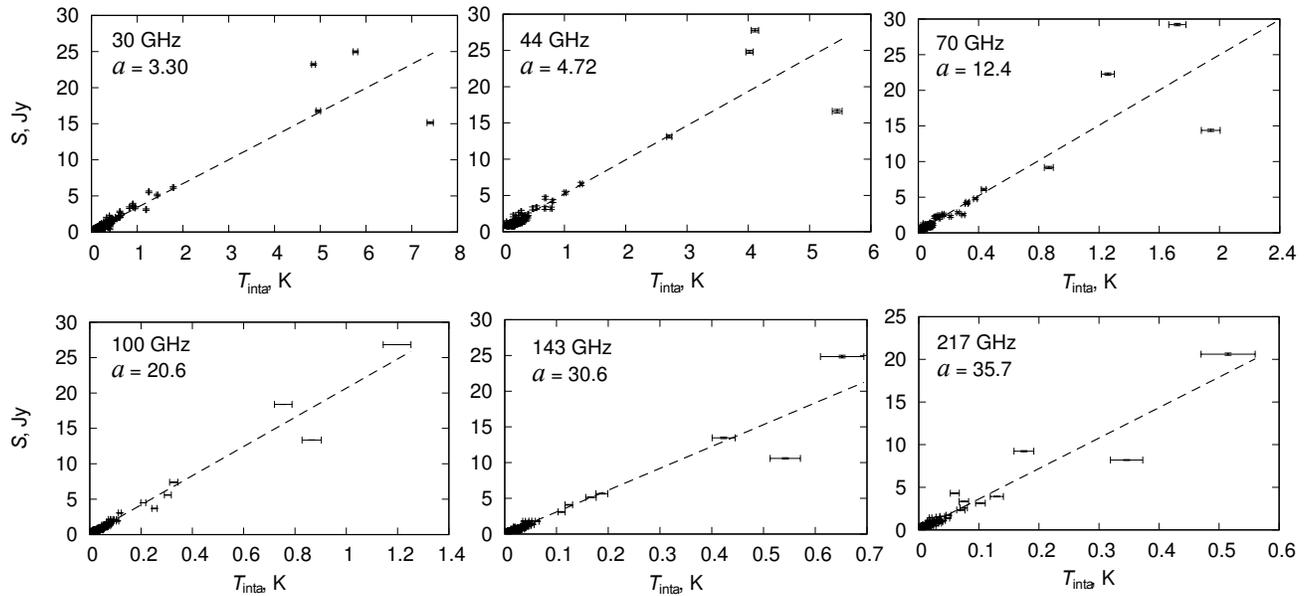


Рис. 2. Зависимости плотности потока для источников из каталога Planck от интенсивности (термодинамической температуры), измеренной по картам микроволнового излучения миссии Planck изофото-скорректированным методом, реализованным программой SExtractor, и калибровочные прямые; здесь a — угловой коэффициент калибровочной прямой. Выборка содержит порядка 100 источников.

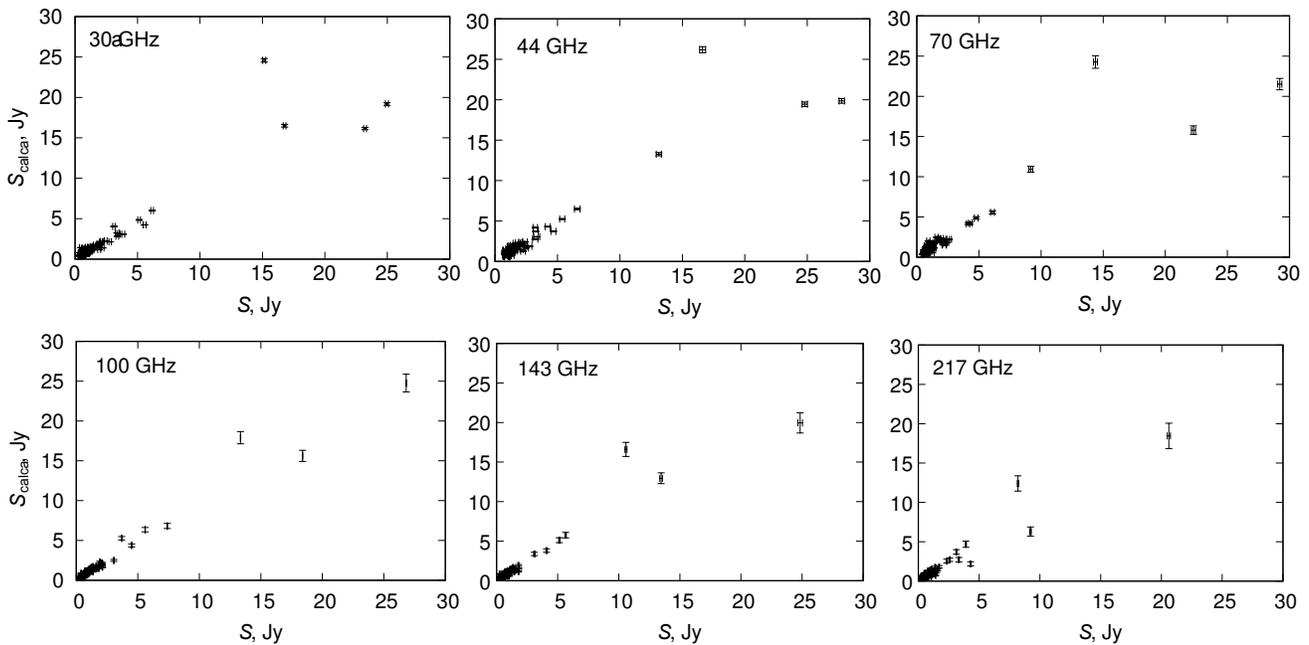


Рис. 3. Зависимости плотности потока для источников из каталога Planck от плотности потока, рассчитанной из интегральной интенсивности, измеренной по картам микроволнового излучения. Карты не сглаживались.

4. СПЕКТРЫ ПЯТЕН

Для анализа средних спектров пятен ($T_{\theta}(\nu)$ и $S_{\theta}(\nu)$), характеризующих зависимость мощности излучения областей неоднородностей от частоты наблюдения, исследовались зоны, показанные на

рис. 1. Объемы выборок, используемых для построения средних спектров, приведены в таблице 3.

Выбор неоднородностей (пятен) проводился в зонах на карте космического микроволнового фона. Для выделения использовалась карта, восстановленная методом SMICA [2]. Дальнейший ана-

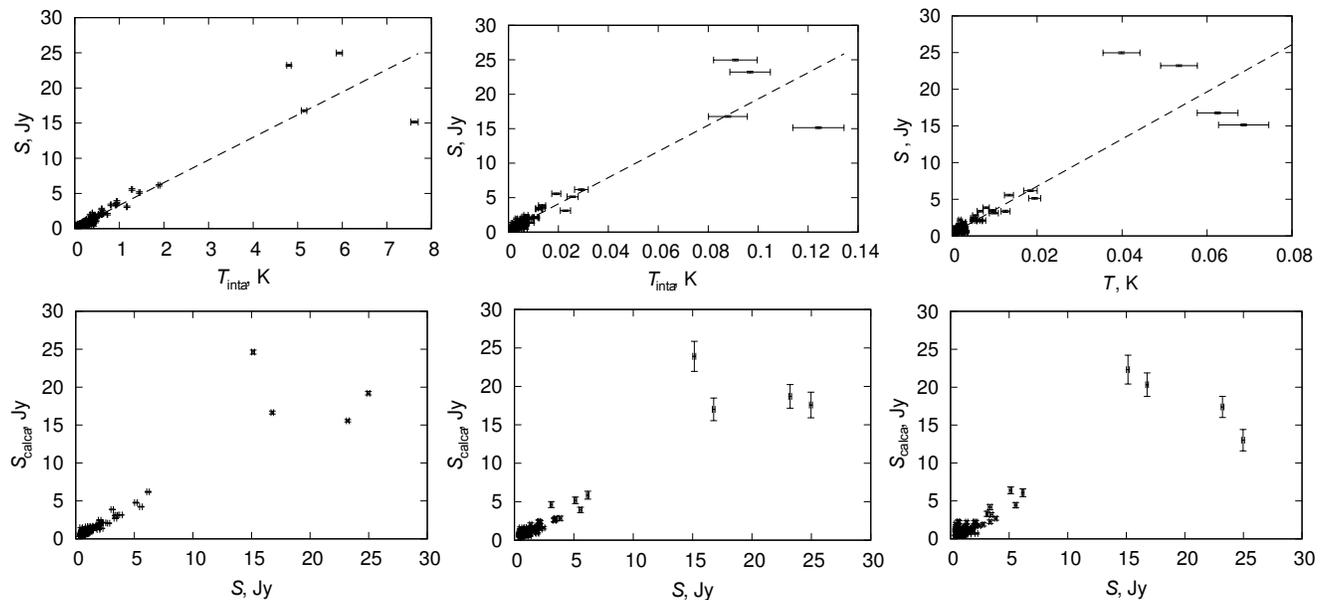


Рис. 4. Верхний ряд слева направо: зависимости плотности потока на частоте 30 ГГц для источников из каталога Planck от интегральной интенсивности, измеренной по картам микроволнового излучения для различных угловых размеров сглаживания карты (соответственно слева направо 5', 35', 60'). Нижний ряд слева направо: зависимости плотности потока для источников из каталога Planck от плотности потока, рассчитанной из интегральной интенсивности, измеренной по сглаженным картам микроволнового излучения (размер окна сглаживания соответственно 5', 35', 60').

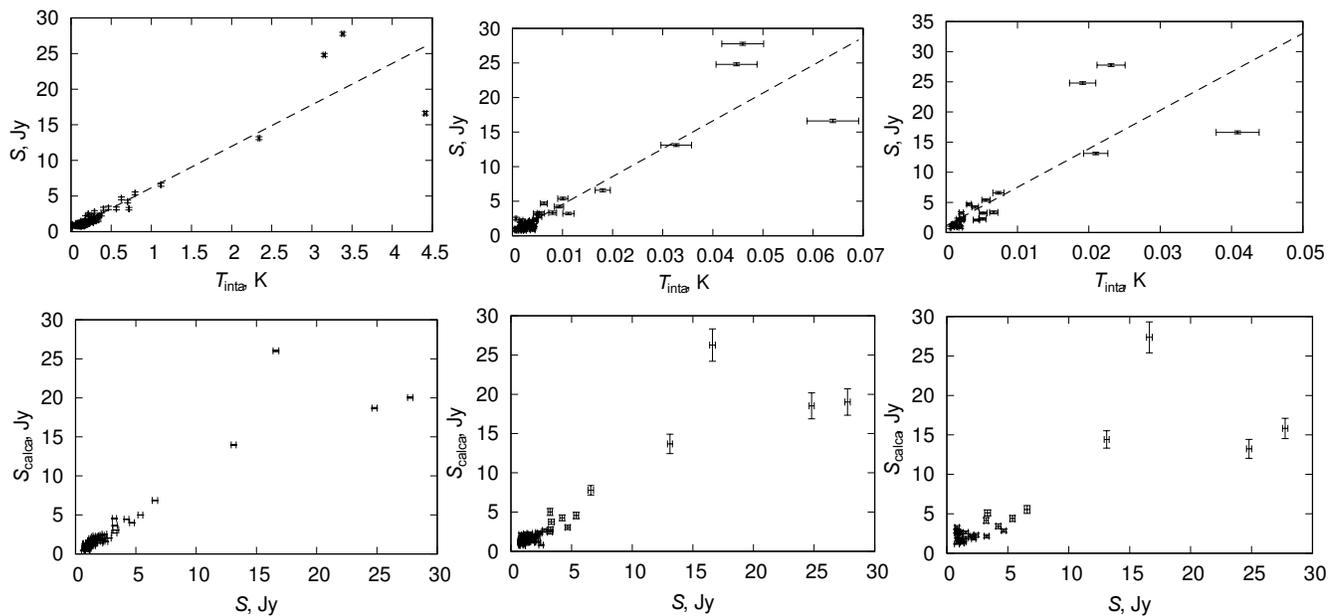


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но на частоте 44 ГГц

лиз, включающий удаление фоновой составляющей в выбранной зоне и оценку амплитуды неоднородности, проводился с помощью процедур пакета SExtractor.

Спектры неоднородностей мы строили для двух энергетических единиц: термодинамической температуры $T_{\text{cmb}}(\nu)$ (рис. 10) и плотности потока

$S(\nu)$ (рис. 11). Привязка по плотности потока для пятен разного размера была сделана в соответствии с калибровочными кривыми, описанными в предыдущем разделе. Для термодинамической температуры привязка не проводилась, так как архивные карты обсерватории Planck предоставлены уже в этих единицах.

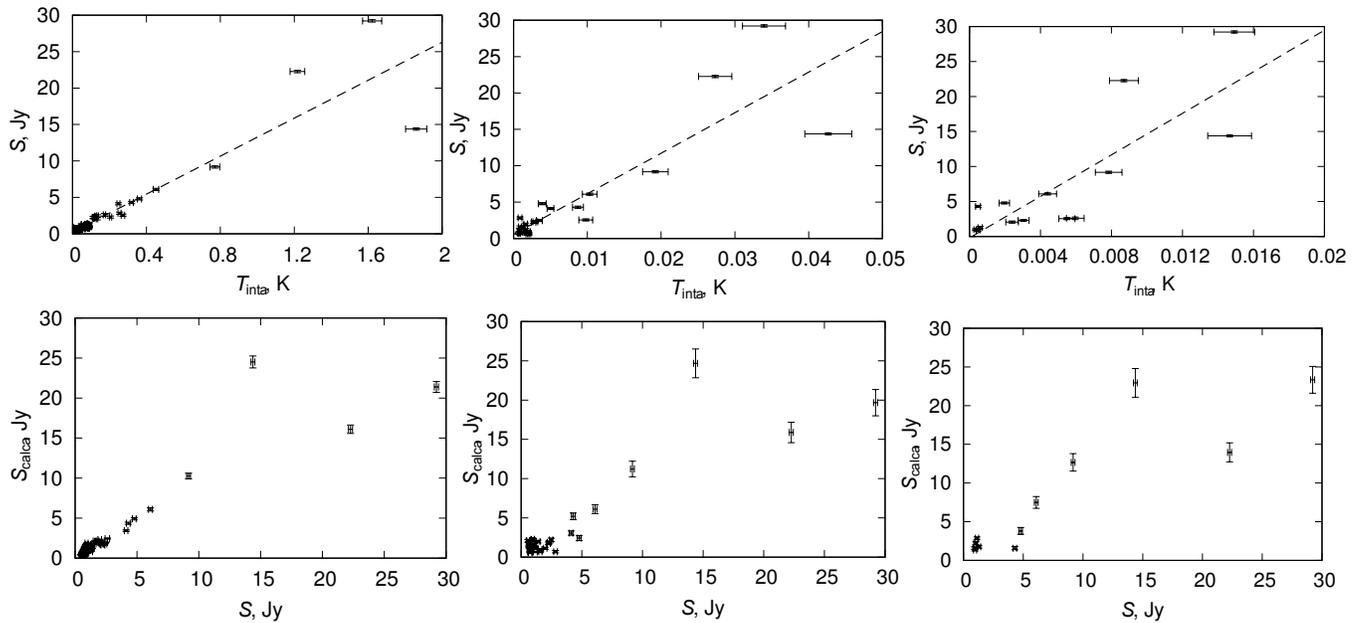


Рис. 6. То же, что на рис. 4, но на частоте 70 ГГц

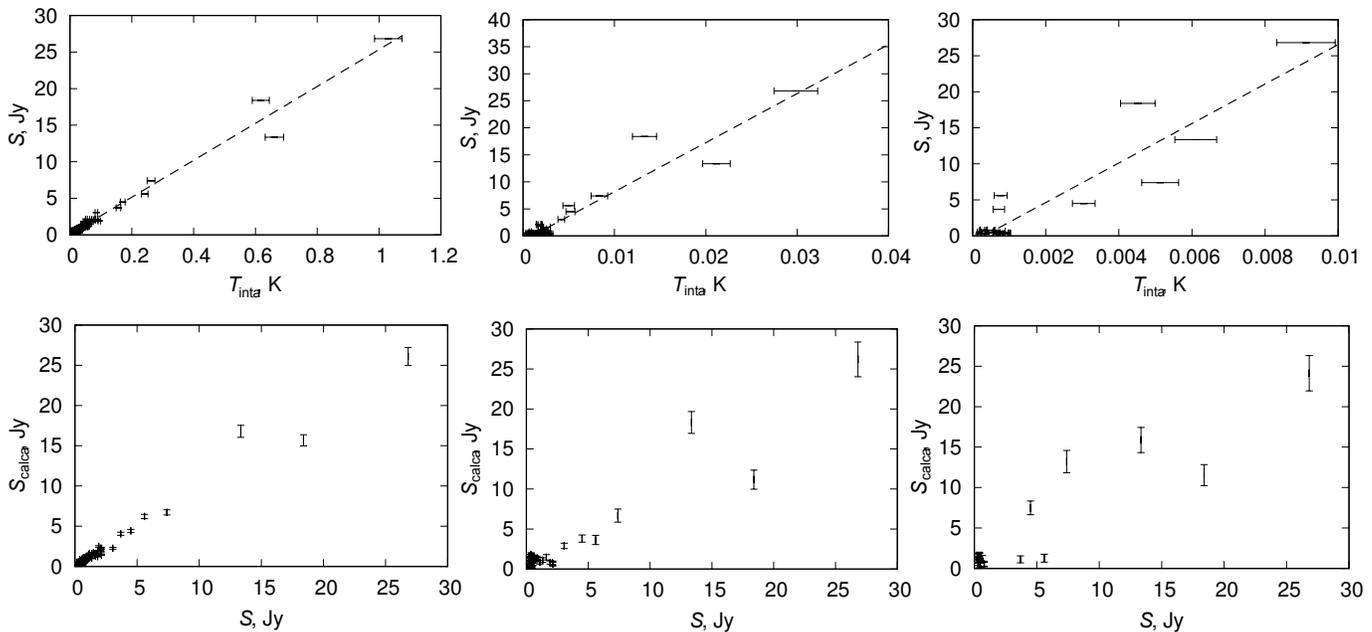


Рис. 7. То же, что на рис. 4, но на частоте 100 ГГц

Из результатов построения спектров $T_{\theta}(\nu)$ видно существенное различие данных на частоте 70 ГГц, где наблюдается локальный пик в спектре. Амплитуда пика уменьшается с переходом на большие масштабы. Стандартный тренд: спад температуры на частотах от 30 до 44 ГГц, локальный пик на 70 ГГц и рост далее от 100 до 217 ГГц прослеживается для всех размеров. Большой пик в среднем спектре неоднородностей на малых

масштабах может говорить либо о шумовых свойствах самого регистрационного канала, либо об особенностях распределения фонового излучения нашей Галактики на выбранных площадках. Также отметим, что отличающееся распределение вариаций температуры фонового излучения на частоте 70 ГГц наблюдается и на площадках с эффектом Сюняева–Зельдовича, где на данной частоте нередко регистрируется положительный

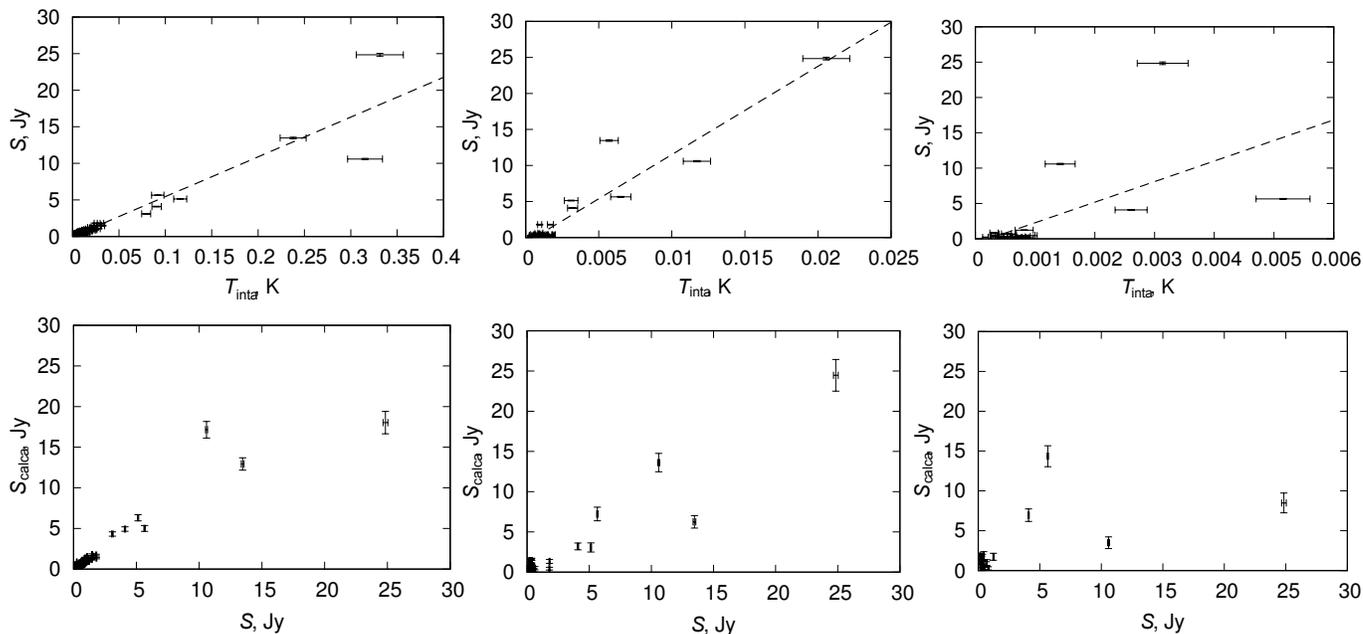


Рис. 8. То же, что на рис. 4, но на частоте 143 ГГц

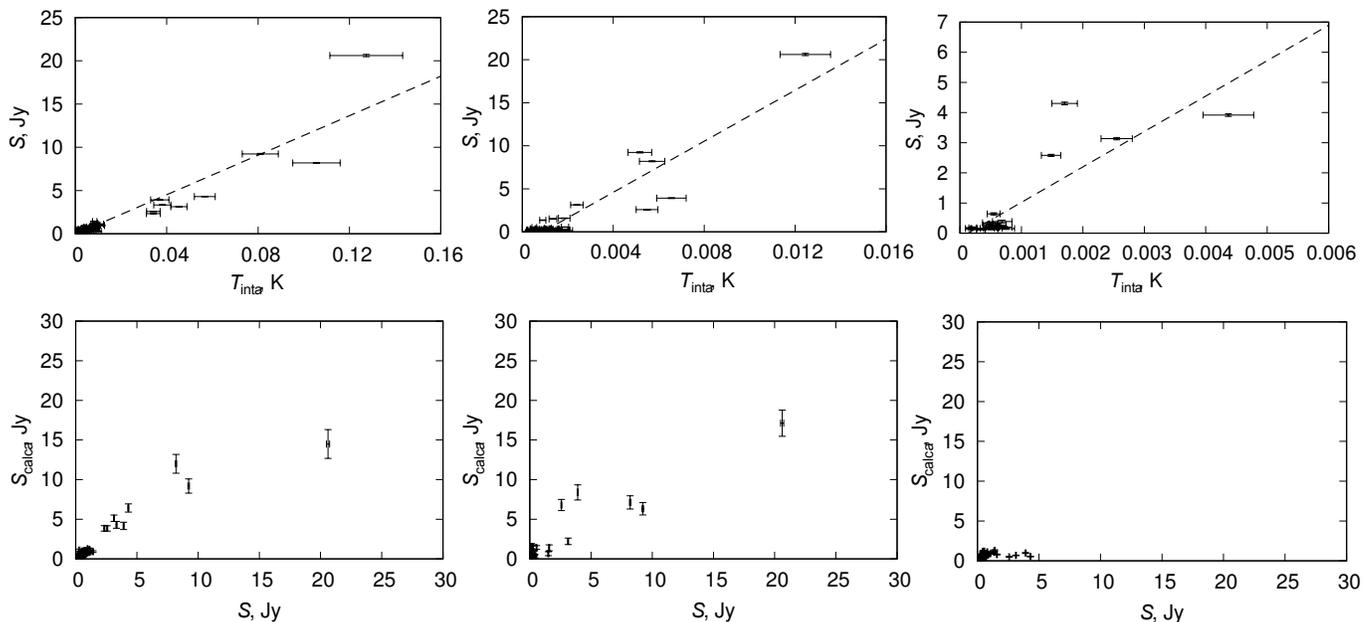


Рис. 9. То же, что на рис. 4, но на частоте 217 ГГц

экстремум, как это было обнаружено, в частности, в работе [28].

Другие свойства показывают спектры $S_{\theta}(\nu)$. Для спектров, построенных по данным карт как без сглаживания, так и с окнами сглаживания $5'$ и $35'$, наблюдается общий гладкий тренд роста от низких частот к высоким. Однако для неоднородностей, выделяемых окном сглаживания $60'$, четко прослеживается максимум в области 100–143 ГГц, и

форма спектра соответствует чернотельному. Этот максимум обнаруживается на масштабах, соответствующих положению первого пика в спектре мощности $C(\ell \approx 200)$ на карте реликтового излучения, и, по-видимому, указывает на стандартную чернотельную природу пятен этого размера. На меньших размерах проявляется дополнительный вклад других компонент, и, в частности, если судить по тепловому спектру, он может быть связан с

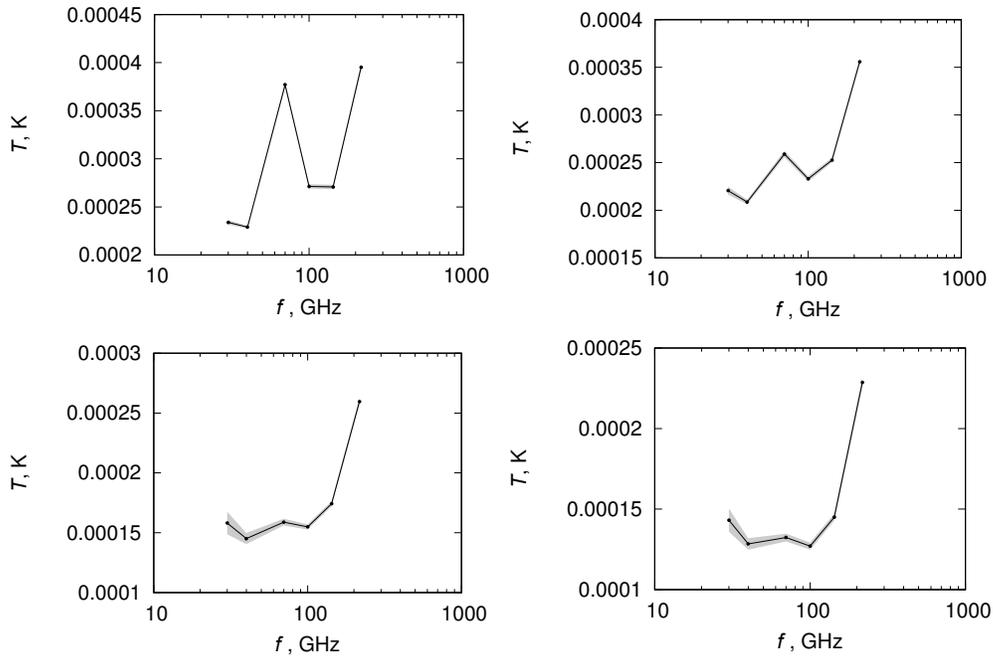


Рис. 10. Усредненный спектр $T_{\theta}(\nu)$ для неоднородностей из карты космического микроволнового фона, наблюдаемых на многочастотных картах миссии Planck. Спектр построен для неоднородностей, выделенных сглаживанием с различным угловым масштабом (слева направо сверху вниз: без сглаживания и с окнами сглаживания $5'$, $35'$ и $60'$ соответственно); по оси ординат отложены амплитуды неоднородностей в градусах Кельвина термодинамической температуры. Серым цветом отмечен разброс оценки значения точек спектра, рассчитываемых при усреднении данных.

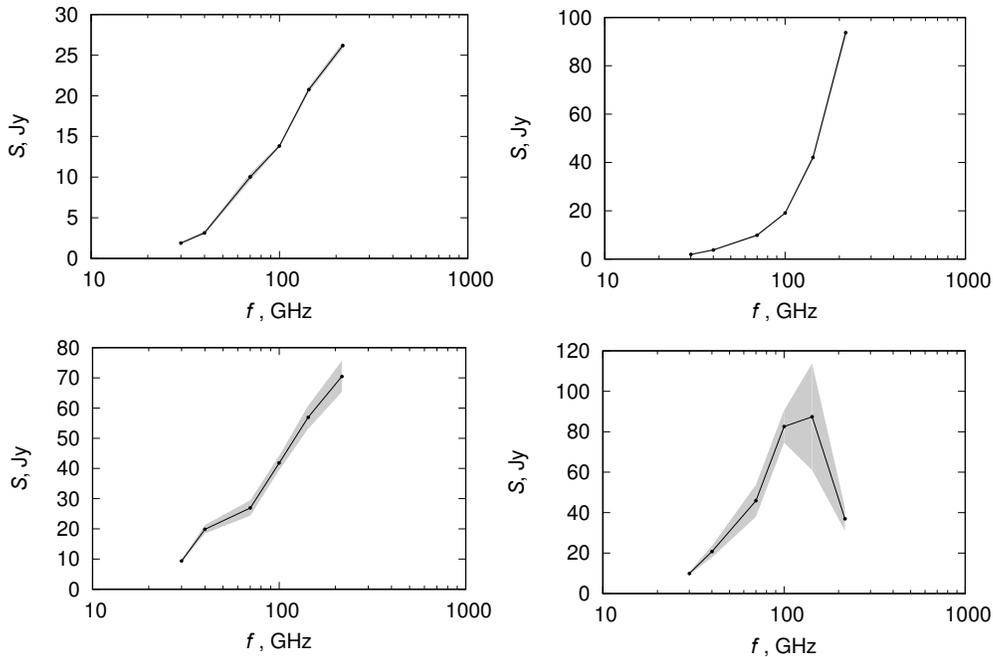


Рис. 11. Усредненный спектр $S_{\theta}(\nu)$ для неоднородностей из карты космического микроволнового фона, наблюдаемых на многочастотных картах миссии Planck. Спектр построен для неоднородностей, выделенных сглаживанием с различным угловым масштабом (слева направо сверху вниз: без сглаживания и с окнами сглаживания $5'$, $35'$ и $60'$ соответственно); по оси ординат отложены амплитуды неоднородностей в единицах плотности потока. Серым цветом отмечен разброс оценки значения точек спектра, рассчитываемых при усреднении данных.

Таблица 3. Объемы выборок (число) пятен микроволнового фона, использованных для построения спектров $T_\theta(\nu)$ и $S_\theta(\nu)$

θ , arcmin	N_T	$N_{F.D.}$
0	12000	19400
5	5100	8850
35	480	680
60	315	360

присутствием источников, содержащих пыль [29], либо далеких ($z > 2$) объектов со звездообразованием. Отметим, что вывод о присутствии большого числа таких объектов в PSZ-каталоге кандидатов⁷ в скопления галактик был сделан еще в работе [30]. Эти источники проявляются как фоновый избыток пылевых галактик со звездообразованием, имеющих цвета, согласующиеся с положением источников на $z > 2$. Причем такие источники можно рассматривать как вероятные кандидаты в прото-скопления [30].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены спектральные свойства неоднородностей космического микроволнового фона. Спектры были построены в рамках зависимостей термодинамической температуры и эквивалентной плотности потока от частоты.

Исходная задача заключалась в проверке двух гипотез, состоящих в том, что 1) повторяющийся для многих источников подъем спектра $S_\theta(\nu)$ может быть связан с неудаленным фоновым излучением на малых угловых масштабах, и 2) на некоторых (теоретически неопределенных) масштабах в пятнах может присутствовать сигнал, отличающийся от теплового, от объектов в дорекомбинационную эпоху. Если горячие пятна, соответствующие неоднородностям СМВ и наблюдаемые на многочастотных каналах, имеют отличный от теплового электромагнитный спектр, то это будет означать, что они либо содержат вклад других фоновых компонент, либо часть из них может быть результатом взаимодействия с объектами в дорекомбинационную эпоху (например, с первичными черными дырами, если такие были). Среди мешающих фоновых компонент излучения, возможно, приводящих к подъему спектра в красной области, как показано в работах [17–21], могут быть и слабые источники, и пыль Галактики. Мы проверяли популяционные свойства пятен разного размера, для чего проводили сглаживание исходных карт с окном заданного

углового размера и в дальнейшем осреднение пятен с помощью процедуры *стэкинга* — совмещения центров пятен и осреднения как объектов одной популяции. После чего строили для пятен разных размеров спектры $T(\nu)$ и $S(\nu)$, где $T(\nu)$ — это термодинамическая температура пятна на частоте ν , а $S(\nu)$ — плотность потока, вычисляемая при рассмотрении осредненного пятна как радиоисточника. Во втором случае по ярким радиоисточникам каталога миссии Planck были предварительно построены калибровочные зависимости для перевода данных измерений на картах анизотропии термодинамической температуры в плотности потока. По данным измерений амплитуд неоднородностей, соответствующих пятнам разного размера, с применением многочастотных карт космической миссии Planck мы построили средние спектры в диапазоне частот от 30 до 217 ГГц. Осреднение спектров проводилось для сотен областей, центрированных на положительные пики в зоне неоднородностей, которые рассматриваются процедурой поиска как отдельные источники излучения.

По зависимости термодинамической температуры от частоты было обнаружено, что карта на частоте 70 ГГц имеет распределение сигнала, отличающееся от данных на других частотах, и в зависимости от окна сглаживания карты форма спектра $T_\theta(\nu)$ меняется. В то же время для спектров неоднородностей, представленных зависимостью плотности потока от частоты $S(\nu)$, на высоких мультиполях ($\ell > 200$) обнаружено отличное от низких мультиполей ($\ell < 200, \theta > 30^\circ$) поведение сигнала. Оно демонстрирует спектр, монотонно растущий с увеличением частоты. Появление максимума на 70 ГГц в спектре $T(\nu)$ и его исчезновение при сглаживании карты могут быть связаны со сложными систематическими эффектами в исследуемом канале, вызванными, например, формой диаграммы направленности или особенностями, связанными с калибровкой. И то и другое компенсируется при переходе к плотности потока с помощью калибровочных кривых, что и наблюдается на графиках спектра для $S(\nu)$ (рис. 11).

Отметим, что колебания среднего спектра $T(\nu)$ для несглаженной карты и сглаженной гауссианой с шириной $5'$, где наблюдается пик на частоте 70 ГГц, в принципе может также иметь и статистическую природу, обусловленную шумами на многочастотных картах.

По виду формы построенных средних спектров можно сказать, что для поиска наблюдаемых на картах СМВ и многочастотных картах Planck пятен (то есть неоднородностей с положительным сигналом), у которых могут быть нетривиальные спектральные свойства, в дальнейшем следует проводить отдельный анализ для каждого пятна.

⁷Planck high- z source candidates

Иначе статистическая неоднородность материала при осреднении будет нивелировать ожидаемый эффект от искомым искажений нетепловой природы.

Что касается возможных причин отклонения спектров от теоретического на высоких мультиполях в диапазоне частот свыше 100 ГГц, для которого ожидалось соответствие излучению абсолютно черного тела, то можно предположить, что на этих угловых масштабах могут быть существенны и остаточный вклад пылевых компонент нашей Галактики, и фоновые источники на больших красных смещениях ($z > 2$), и скопления галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича. В пользу вклада неразрешенных фоновых источников с $z > 2$ говорят и модели фонового излучения инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов, подготовленные для анализа данных планируемой космической миссии «Миллиметрон» [31]. Тогда построенные средние спектры могут быть использованы и для сравнительного анализа уровня чистки карт обзора обсерватории «Миллиметрон». Кроме того, пока нельзя исключить, что самые первые массивные объекты, вносящие искажения в электромагнитный спектр реликтового излучения, также могут дать дополнительный сигнал.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою благодарность рецензентам за прочтение и важные замечания к тексту статьи, позволившие значительно улучшить текст. Также авторы признательны ESA за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **594**, A1 (2016).
2. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **594**, A10 (2016).
3. V. Stolyarov, M. P. Hobson, M. A. Ashdown, and A. N. Lasenby, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **336**, 97 (2002).
4. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **571**, A11 (2014).
5. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **571**, A14 (2014).
6. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **566**, A55 (2014).
7. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **576**, A104 (2015).
8. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **571**, A12 (2014).
9. B. T. Draine and A. Lazarian, *Astrophys. J.* **508**, 157 (1998).
10. A. de Oliveira-Costa, M. Tegmark, D. P. Finkbeiner, et al., *Astrophys. J.* **567**, 363 (2002).
11. D. P. Finkbeiner, F. I. Langston, and A. H. Minter, *Astrophys. J.* **617**, 350 (2004).
12. T. A. Semenova, Yu. N. Pariiskii and N. N. Bursov, *Astronomy Reports* **53**, 1 (2009).
13. E. Komatsu, C. L. Bennet, C. Barnes, et al., *Progress Theor. Exper. Physics*, № 6, id.06B10224 (2014).
14. Y. Ali-Haimoud, C. M. Hirata, and C. Dickinson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **395**, 1055 (2009).
15. K. Silsbee, Y. Ali-Haimoud, and C. M. Hirata, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **411**, 2750 (2011).
16. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **571**, A13 (2014).
17. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 156 (2015).
18. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomy Letters* **41**, 457 (2015).
19. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomy Reports* **60**, 630 (2016).
20. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **71**, 139 (2016).
21. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, et al., *Astronomy Reports* **61**, 297 (2017).
22. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **594**, A26 (2016).
23. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
24. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
25. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **14**, 275 (2005).
26. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **20**, 1053 (2011).
27. D. C. Wells, E. W. Greisen, and R. H. Harten, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **44**, 363 (1981).
28. O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, O. S. Ulakhovich, et al., *Astrophysical Bulletin* **73**, 1 (2018).
29. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **536**, A24 (2011).
30. Planck Collab., *Astron. and Astrophys.* **596**, A100 (2016).
31. A. A. Ermash, S. V. Pilipenko, V. N. Lukash, arXiv:1812.08575 (2018).

Spectral Properties of Background Signal Peaks at Medium and High Multipoles

V. V. Pushkarev, E. K. Majorova, and O. V. Verkhodanov

The spectral properties of inhomogeneities of the cosmic microwave background are considered. The inhomogeneity spectra are studied in the frequency range from 30 to 217 GHz according to multi-frequency maps of the Planck space mission with smoothing at different angular sizes. According to the thermodynamic temperature versus frequency relation, it is shown that the map at 70 GHz has a signal distribution that differs from the data at other frequencies depending on the smoothing window. At 70 GHz, there is a peak in the spectrum, most strongly manifested on maps without smoothing. In the inhomogeneity spectra represented by the frequency dependence of the flux density for data at high multipoles ($\ell > 200$, $\theta < 30'$), the signal behavior different from the low multipoles ($\ell < 200$) was found, which demonstrates a monotonically growing spectrum with an increase in frequency from 30 to 217 GHz.

Keywords: *cosmic background radiation—cosmology: observations*