

СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 524.827

НАЙДЕН ЯРОСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО
МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА НА НИЗКИХ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ**

Специальность 01.03.02 — “Астрофизика и звёздная астрономия”

Диссертация на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник Верходанов О.В.

Нижний Архыз – 2014

Содержание

Введение	6
1 Введение в методы анализа на сфере	17
1.1 О спектральных параметрах гауссового поля	17
1.2 Проблема пикселизации	19
1.2.1 Пикселизация неба по методу Гаусса–Лежандра	20
2 Методы анализа статистических свойств реликтового излучения 25	
2.1 Мозаичная корреляция	26
2.2 Картографирующие эstimаторы	27
2.2.1 Эstimатор стандартного отклонения углового спектра мощности	28
2.2.2 Эstimатор стандартного отклонения разности спектров мощности	28
2.2.3 Эstimатор вклада четных гармоник	29
2.3 Фурье–образы одномерных сечений	29
2.3.1 Система анализа Фурье–образов одномерных сечений . .	30
3 Исследование статистических аномалий	39
3.1 Осевые симметрии в данных Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Internal Linear Combination (ILC)	40
3.1.1 Обоснование	40
3.1.2 Алгоритм анализа данных	41
3.1.3 Результаты	42
3.2 Влияние инфракрасных и субмиллиметровых источников на микроволновый фон	44

3.2.1	Использованные данные	45
3.2.2	Алгоритм обработки	47
3.2.3	Результаты	49
3.2.4	О мультиполях $\ell = 3$ и 6	55
3.3	Исследование неоднородности реликтового фона по угловому спектру мощности	60
3.3.1	Особенности метода	61
3.3.2	Результат	62
3.4	Корреляционные свойства Cosmic Microwave Background (CMB), The 2MASS Redshift Survey (2MRS) и Sloan Digital Sky Survey (SDSS)	68
3.4.1	Использованные данные	69
3.4.2	Корреляционные функции	72
3.4.3	Результаты	73
4	Web-сервер для анализа данных на сфере	78
4.1	Введение	78
4.2	Архитектура базы данных	80
4.3	Получение области с заданным разрешением	84
5	Пакет для работы со сферическими функциями GlesPy	88
5.1	Архитектура GlesPy	88
5.2	Класс пиксельных карт PixelMap	89
5.3	Класс для манипуляций с коэффициентами сферических гармоник Alm	91
5.4	Класс углового спектра мощности Cl	92
5.5	Класс хранилища точечных источников PointSource	92
5.6	Вспомогательные классы	93
5.7	Расширение: классы Angle и Zone	94
	Заключение	96
	Список сокращений	100
	Список рисунков	106

Список таблиц 108

Литература 109

“Потом есть еще историческая память, которая не связана с фактами твоей жизни или с тем, что ты прочитал. Она хранит те события, которые случились до твоего рождения.

Сегодня, если ты отправляешься в кинотеатр, ты должен прийти к началу фильма. Когда фильм начинается, то тебя как бы все время ведут за руку, объясняя, что происходит. В мои времена можно было войти в кинотеатр в любой момент, даже в середине фильма. Множество событий случалось до твоего прихода, и приходилось домысливать то, что происходило ранее. Когда фильм начинался сначала, можно было увидеть, правильна ли твоя реконструкция. Если фильм нравился, то можно было остаться и посмотреть его еще раз. Жизнь напоминает просмотр фильма в мои времена. Мы рождаемся в момент, когда уже произошло множество событий на протяжении сотен тысяч лет, и важно понять, что же случилось до нашего рождения. Это нужно для того, чтобы лучше понять, почему сегодня происходит столько новых событий.”¹

УМБЕРТО ЭКО

¹Umberto Eco: "Caro nipote, studia a memoria",
оригинал публикации: <http://goo.gl/hFSBxG>,
перевод по версии сайта Иносми <http://goo.gl/UZ0pcT>

Введение

Сегодня мы можем смело утверждать, что живем в эпоху точной космологии, т.е. эпоху очень точных измерений космологических параметров, что возможно благодаря ряду космических экспериментов таких, как WMAP [1–10] и Planck [11–30].

В русскоязычной литературе явление, которое помогает нам определять космологические параметры с огромной точностью, называется *реликтовым излучением*. В английском языке принят другой термин, который точнее отражает реальность — *CMB*, что переводится как ‘космический микроволновый фон’.

Это излучение является самым первым снимком Вселенной, который мы можем получить, т.к. оно начало формироваться в процессе первичного нуклеосинтеза [31]. В начале все вещество пребывало в состоянии плазмы, поэтому оно было непрозрачно для излучения до эпохи рекомбинации, которая наступила через 380 000 лет после Большого Взрыва. С момента первичной рекомбинации Вселенная стала прозрачной, и излучение, которое сформировалось в более ранние эпохи, начало свободно распространяться и сохранило информацию о физических условиях в первичные эпохи, благодаря чему, мы можем оценить их параметры с большой точностью.

Таким образом, уникальность реликтового излучения заключается в том, что он дошло до нас от самого Большого Взрыва и при этом очень равномерно распределено по всему пространству. Важность же этого явления настолько велика, что за него дали две Нобелевские премии — за открытие (1978 г., Пензиас и Вильсон [32]) и за обнаружение его анизотропии (2006 г., Смут и Мазер [33]).

Отметим еще два важных свойства реликтового излучения. Первое заключается в том, что его спектр описывается формулой Планка (1), т.е. оно является чернотельным. А температура очень мала — всего ≈ 2.723 К.

$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^2} \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} \quad (1)$$

Вторым важным свойством является его высокая степень однородности — неоднородность температуры проявляется в различных направлениях только в третьем знаке после запятой ($\Delta T \sim 10^{-3}$). С физической точки зрения, такую изотропию очень трудно реализовать. Поэтому такое свойство может говорить, о том, что это излучение действительно обладает космологической природой. Кроме того, это достаточно хорошо для нас, т.к. в этом случае эволюция Вселенной должна описываться достаточно просто.

Актуальность

Согласно стандартной инфляционной Λ CDM–космологии [34–36], реликтовое излучение должно обладать не только изотропией в большой степени, но и его анизотропия есть следствие случайного гауссового поля. Отсюда вытекает проблема, известная как космическая вариация [37]. Дадим расшифровку этого понятия. Поскольку космический микроволновый фон равномерно распределен по Вселенной, наблюдатель в любой произвольно взятой точке должен видеть почти одни и те же статистические свойства этого излучения. Чтобы получить их точные значения, надо иметь либо ансамбль наблюдателей, либо ансамбль Вселенных для осреднения наблюдательных проявлений анизотропии. Однако, мы не обладаем возможностью иметь ни то, ни другое, поэтому приходится оценивать космологические параметры в некоторой, достаточно узкой, области допустимых значений и по ним вычислять наиболее вероятные значения. На рисунке 1 приведен угловой спектр мощности анизотропии реликтового излучения, полученный командой Planck и опубликованный в работе [11]. Широкая область на низких мультиполях как раз обусловлена космической вариацией. Разброс оказывается наибольшим в этой области из-за того, что на низких гармониках

мультипольное разложение имеет меньшее число пиков, чем на высоких, а спектр мощности для ℓ -ой гармоники определяется математически как среднее значение мощности пятен, следовательно, на больших масштабах мы будем иметь меньшее число пятен для осреднения.

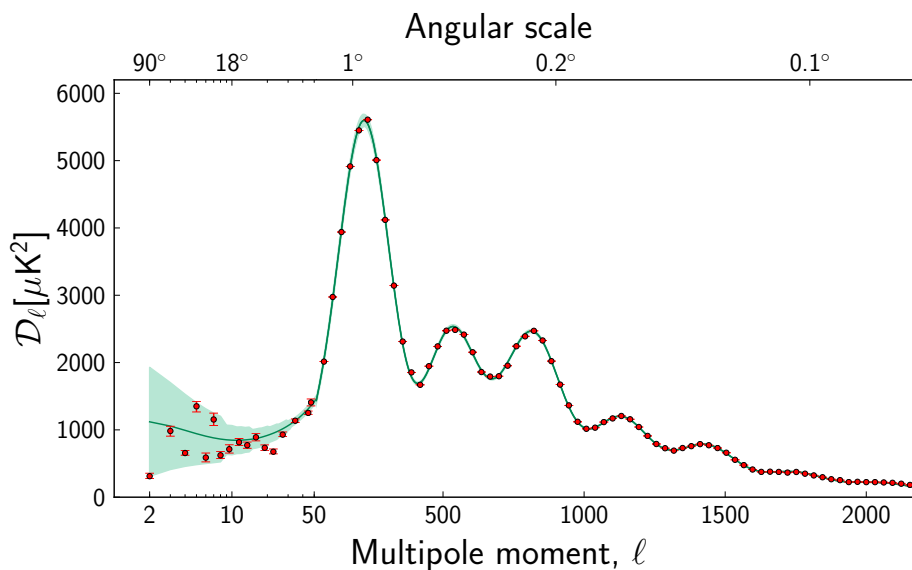


Рисунок 1: Угловой спектр мощности, полученный командой Planck до $\ell = 2200$ [11]. До $\ell = 50$ по оси абсцисс логарифмический масштаб, а дальше линейный. Семь теоретически рассчитанных в Λ CDM–космологической модели акустических пиков совпадают с наблюдательными данными.

Область $\ell \leq 50$ оказывается наиболее интересной для исследований не только из-за большого разброса значений на низких мультиполях, но и потому, что открытые для свободного доступа карты реликтового излучения ILC WMAP ограничены угловым разрешением $\ell_{max} = 100$ [1]. Были получены карты большего разрешения, но они были признаны недостаточно надежными [2–4]. Однако этот факт не сильно сказался на определении основных космологических параметров, т.к. последние определяются точками спектра мощности до первого пика включительно, при фиксированной космологической модели (см. рисунок 1), а все свойства этого пика опи-

сываются как раз на разрешении $\ell \leq 220$. Поэтому предоставленная карта вполне пригодна для использования с точки зрения космологии. Кроме того, это ограничение не мешает определять спектр мощности реликтового излучения другим путем — через так называемый псевдо-спектр мощности C_ℓ^{pseudo} , который вычисляется для сигнала на неполной сфере.

После появления данных WMAP были опубликованы статьи, в которых обсуждались отклонения карты ILC от гауссовости — статистическая анизотропия. Оказалось, что статистические свойства различных площадок неожиданно сильно отличаются, что не согласуется с простыми инфляционными сценариями [36]. Это может быть показателем того, что следует рассматривать более сложные инфляционные теории [38–40].

Дадим обзор некоторых обнаруженных проявлений негауссовости.

Аномалии

Впервые негауссовость была обнаружена с помощью фазового анализа [41–43]. Он опирается на следующее комплексное представление коэффициентов разложения по сферическим функциям:

$$a_{\ell m} = |a_{\ell m}| e^{i\phi_{\ell m}}, \quad (2)$$

где $\phi_{\ell m}$ — фаза гармоники, которая для гауссового распределения первичных возмущений должна иметь равномерное распределение, а модуль $a_{\ell m}$ — распределение Релея. Поэтому если неоднородности реликтового излучения являются гауссовым полем, то они приводят к равномерному распределению фаз в интервале $[0, 2\pi]$ и гауссовому распределению амплитуд.

Наиболее известными статистическими проявлениями анизотропии являются:

1. “Ось Зла” [44],
2. “нечетность Вселенной” [45, 46],
3. “Холодное Пятно” [47],
4. “горячий галактический Юг” [27].

Рассмотрим некоторые из них.

“Нечетность Вселенной” Ярким проявлением негауссовости может служить так называемая нечетность сигнала, на которую впервые в угловом спектре мощности указали Ким и Насельский в [46]. До них авторы [45] показали, что если раздельно вычислить спектр мощности четных и нечетных гармоник, то относительная доля последних оказывается больше на больших масштабах и показали, что уровень достоверности этого эффекта составляет 95%. Метод анализа четности сигнала [46] основывается на мультипольном разложении (уравнение (1.4)) и получении углового спектра мощности (уравнение (1.3)). На низких мультиполях в угловом спектре мощности реликтового излучения ожидается плато за счет эффекта Сакса–Вольфа $\ell(\ell + 1)C_\ell \approx \text{const}$ [48]. Авторы [46] выяснили, что вклад нечетных гармоник оказывается больше, чем четных на малом разрешении, поэтому этот феномен был назван ‘асимметрией четности’.

Холодное пятно С помощью вейвлета Spherical Mexican Hat Wavelet (SMHW) [49] в карте ILC WMAP удалось выделить холодную область [47], наличие которой предлагается в качестве объяснения для негауссовости сигнала на Юге. Положение холодного пятна в галактических координатах: $b = -57^\circ$, $l = 209^\circ$, радиус $r = 5^\circ$ [50]. Вероятность соответствия гауссовой модели распределения сигнала при использовании SMHW составляет около 0.2% [47]. При удалении холодного пятна из карты, оставшийся сигнал становится гауссовым (рисунок 2).

При анализе обзора NVSS [51] был выявлен [52] недостаток источников в холодном пятне, что повлекло за собой появление гипотез о том, что оно может быть связано с гигантским эффектом Сакса–Вольфа [52], топологическим дефектом [50] и других. Надо отметить, что это пятно не является уникальным, а его свойства определяются в основном низкими мультиполями $2 \leq \ell \leq 20$.

На сегодня опубликовано более 500 работ, которые посвящены негауссовым свойствам реликтового фона. Поскольку эти свойства могут свидетельствовать об остаточном сигнале фоновых компонент в реликтовом

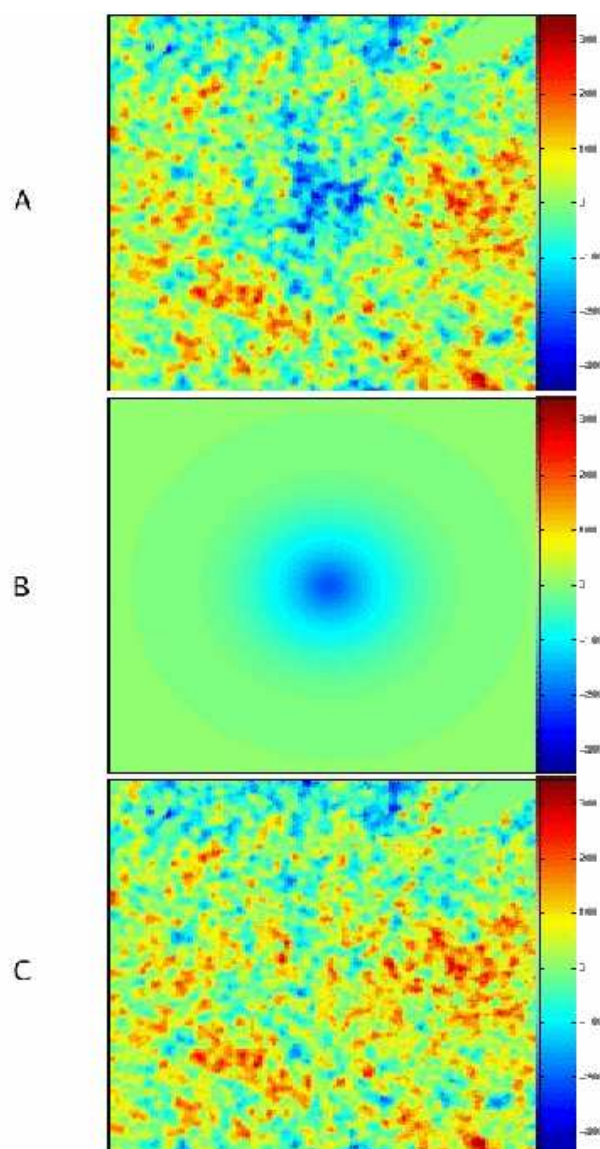


Рисунок 2: Сверху холодное пятно ($b = -57^\circ$, $l = 209^\circ$ размер области $43^\circ \times 43^\circ$) по данным WMAP, в середине шаблон текстуры, внизу — холодное пятно после вычитания шаблона [50].

излучении или накладывать ограничения на космологические модели, что подчеркивает актуальность данной темы.

По причинам, описанным выше, в данной работе продолжается исследование гауссовых свойств космического микроволнового фона, развиваются новые методы и расширяются уже проверенные.

Основной целью работы является анализ статистических свойств анизотропии микроволнового фона. С этим связана вторая цель — создание новых методов и инструментов для исследования реликтового излучения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка новых методов анализа данных на сфере.
2. Разработка новых инструментов для исследования реликтового излучения, вклада фоновых компонент и точечных источников.
3. Моделирование данных в рамках стандартной Λ CDM–космологии.

Основные положения работы

Во **Введении** дается актуальность работы, формулируются цели, новизна, степень достоверности, практическая значимость, основные результаты, выносимые на защиту и апробации.

В **Главе 1** приведено математическое введение в анализ данных на сфере и коротко описана схема пикселизации неба Гаусса–Лежандра, которая была использована во всей работе.

В **Главе 2** изложены методы, которые были разработаны и модифицированы в ходе работы над диссертацией для исследования статистических свойств реликтового излучения.

Далее, в **Главе 3** описываются и обсуждаются результаты реализации методов, которые были введены в диссертации в главе 2.

В **Главе 4** описывается web–система анализа данных на сфере на основе схемы пикселизации неба Gauss–Legendre Sky Pixelization (GLESP). Она содержит инструкции для работы и изложение архитектуры web–системы.

В **Главе 5** дается описание пакета GlesPy, который был разработан в диссертации и открыт для публичного доступа.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

Основные положения, выносимые на защиту

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обнаружение максимального масштаба ячейки неоднородности крупномасштабной структуры $D \sim 60 \text{ Мpc}$ на $z = 0.8$ и 1.9 по данным реликтового излучения и SDSS.
2. Обнаружение статистической анизотропии карты ILC WMAP, связанной с галактическими источниками излучения, на основе корреляции с данным PCCS и 2MASX.
3. Обнаружение статистической анизотропии карты ILC WMAP, связанной с источниками излучения в Солнечной системе, на основе корреляции с FSC.
4. Разработка метода поиска статистической анизотропии с помощью специализированных (математических) эстиматоров и создание системы представления оценок эстиматоров на картах всего неба.
5. Пакет для анализа данных на сфере GlesPy и, разработанная с его помощью, web-система расчета и выбора площадок на небе из сферических гармоник.

Научная новизна

- Впервые определен максимальный размер ячейки неоднородности по микроволновому фону и каталогу SDSS.
- Впервые предложены и реализованы алгоритмы анализа статистической анизотропии с двумерными картографирующими эстиматорами.

- Впервые создан вычислительный web-сервер, предоставляющий возможность строить и анализировать карты как всего неба, так и выбранных участков по гармоническим данным.

Научная и практическая значимость

Показано, что для объяснения аномалий низких гармоник не требуется привлечения сложных моделей инфляции. Фазовые характеристики гармоник демонстрируют, что эти гармоники могут определяться локальным распределением сигнала.

Практическая ценность работы состоит в разработке программного обеспечения, которое может быть использовано как для исследования аномальных зон и гармоник на картах реликтового излучения, так и для исследования отдельных источников и их отождествления, а также в широком классе других схожих задач.

Степень достоверности

Достоверность полученных выводов подтверждается выводами из исследований других авторов, основанных на других данных, оценках или предположениях, использованием проверенных методов анализа гауссовости случайных полей и сравнением результатов с теоретическими модельными данными. Кроме того, показателем достоверности результатов является их апробация на российских и международных конференциях и школах и публикация основных положений в журнале, рекомендованном ВАК и индексируемом WoS, “Астрофизический бюллетень”.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. XXVII конференция “Актуальные Проблемы Внегалактической Астрономии” (2010)

2. XXVIII конференция “Актуальные Проблемы Внегалактической Астрономии” (2011)
3. XXX конференция “Актуальные Проблемы Внегалактической Астрономии” (2013)
4. XV международная школа “Частицы и Космология” (2011)
5. Всероссийская астрономическая конференция “От эпохи Галилея до наших дней” (2010)
6. Всероссийская астрономическая конференция “Многоликая Вселенная” (2013)
7. III-я Молодежная Научная Конференция ГАО РАН (2010)
8. IV-я Молодежная Научная Конференция ГАО РАН (2012)

Личный вклад

- Равный вклад в совместном обсуждении постановки задачи.
- Разработка программного обеспечения на языке `python` для пакета анализа и моделирования карт микроволнового фона.
- Обработка различных карт микроволнового фона.
- Создание web-системы анализа данных.
- Равный вклад в подготовке публикации результатов научных исследований.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных работах, все из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

1. В.С.Беркутов, Я.В.Найден, О.В.Верходанов. Осевые симметрии в данных WMAP ILC. *Астрофизический бюллетень*, т. 65, н. 2, с. 187-195 (2010).
2. Я.В.Найден, О.В.Верходанов. Определение неоднородности карты микроволнового фона по угловому спектру мощности. *Астрофизический бюллетень*, т. 66, н. 3, с. 372-381 (2011).
3. О.В.Верходанов, Т.В.Кешелава, Я.В.Найден. О двух низких гармониках корреляционных карт микроволнового фона. *Астрофизический бюллетень*, т. 67, н. 3, с. 257-265 (2012).
4. О.В.Верходанов, Я.В.Найден. Проявляется ли вклад инфракрасных и субмиллиметровых источников на низких гармониках микроволнового фона? *Астрофизический бюллетень*, т. 67, н. 1, с. 1-18 (2012).
5. Я.В.Найден, О.В.Верходанов. Корреляционные свойства CMB WMAP и каталогов 2MRS и SDSS на разных красных смещениях. *Астрофизический бюллетень*, т. 68, н. 4, с. 496–506 (2013).
6. Я.В.Найден, О.В.Верходанов. Искажения спектра мощности одномерных сечений карт CMB в зависимости от космологической модели. *Астрофизический бюллетень*, т. 68, н. 2, с. 239-248 (2013).
7. Я.В.Найден, О.В.Верходанов. Искажения спектра мощности одномерных сечений карт CMB в зависимости от космологической модели. II. *Астрофизический бюллетень*, т. 68, н. 4, с. 490–495 (2013).
8. О.В.Верходанов, Я.В.Найден, В.Н.Черненко, Н.В.Верходанова. База данных карт протяженного излучения и система доступа к ним. *Астрофизический бюллетень*, т. 69, н. 1, с. 121-128 (2014).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 123 стр. с 53 рис. и 9 табл. (включая список сокращений). Список литературы содержит 140 наименований.

Глава 1

Введение в методы анализа на сфере

Начнем с введения математического аппарата, который используется в работе.

1.1 О спектральных параметрах гауссового поля

В этом разделе будут даны основные параметры гауссового случайного поля. Следуя [53, с. 282], дадим обобщение идей [54, 55] описания шумов, которое можно найти в работах [56, 57] для одномерного, двумерного и трехмерного случаев.

Рассмотрим анизотропию температуры реликтового излучения. Предположим, что оно является случайным гауссовым полем на сфере. Такое поле полностью характеризуется спектром мощности C_ℓ (1.3), а температуру реликтового фона можно представить следующим выражением:

$$T(\vec{q}) = \langle T(\vec{q}) \rangle + \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} C_\ell^{\frac{1}{2}} Y_{\ell m}(\vec{q}),$$

где \vec{q} — единичный вектор, тангенциальный к направлению фотонов $a_{\ell m}$ — коэффициенты разложения температуры (случайные комплексные гауссовы числа), $\langle T(\vec{q}) \rangle$ — среднее значение температуры реликтового излучения по небу, равная $\frac{1}{4\pi} \int T(\vec{q}) d\Omega$, $Y_{\ell m}$ — сферические функции. Коэффициенты $a_{\ell m}$ получаются следующим образом:

$$a_{\ell m} = \int_{-1}^1 dx \int_0^{2\pi} \Delta T(x, \phi) Y_{\ell m}^*(x, \phi) d\phi, \quad (1.1)$$

где * обозначает комплексное сопряжение. В дальнейшем анализе нас будет интересовать анизотропия реликтового излучения, введем для нее обозначение:

$$\Delta T(\vec{q}) = \frac{T(\vec{q}) - \langle T(\vec{q}) \rangle}{\langle T(\vec{q}) \rangle} \quad (1.2)$$

Спектр мощности $C(\theta)$ определяется как двухточечная корреляционная функция:

$$C(\theta) = \langle \Delta T(\vec{q}) \cdot \Delta T(\vec{q}') \rangle, \quad \vec{q} \cdot \vec{q}' = \cos \theta$$

А C_ℓ это

$$C_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2. \quad (1.3)$$

Тогда среднее значение наблюдательно корреляционной функции будет выглядеть как:

$$C(\theta) = \overline{C_{obs}(\theta)} = \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell=2}^{\infty} (2\ell + 1) C_\ell P_\ell(\cos(\theta)).$$

Следует отметить, что в анализе небольших площадок¹ значительно удобнее использовать технику Фурье-анализа на плоскости. Однако, это приближение вносит определенные погрешности, которые рассмотрены в работах [58,59]. В этих работах показано, что “flat sky”-приближение описывает спектр мощности C_ℓ с погрешностью $\delta C_\ell / C_\ell \ll 1$ только для мультиполей с номером $\ell \Theta \gg 1$, где Θ — размер площадки.

¹“flat sky”-приближение, плоское поле

1.2 Проблема пикселизации

Проблема представления и анализа карты неба возникает во всех диапазонах электромагнитного спектра. Эта проблема стала актуальной в астрофизике с появлением полных обзоров неба и необходимостью разложения по сферическим гармоникам протяженного сигнала. Системы пикселизации неба также важны при построении баз данных (глава 4), требующих быстрого поиска небесных объектов. Выбор той или иной схемы пикселизации зависит от особенностей решаемой задачи.

В задачах, связанных с гармоническим разложением сигнала, применяются специальные схемы разбиения сферы. Проблема пикселизации стала особенно актуальной в начале 90-х годов прошлого века, когда появились данные космического эксперимента The Cosmic Background Explorer (COBE) [60]. Команда COBE применила так называемую квадрилатерализованную (т.е. представленную в виде шести квадратов) небесную проекцию куба [60–62].

Уже при применении схемы разбиения неба на основе сетки Quadrilateralized Sky Cube (QSC) стало понятным, что система пикселизации существенно влияет на качество описания данных при анализе протяженного излучения на сфере. При анализе данных большое значение имеют эффективное разложение по сферическим функциям анизотропии излучения и его поляризации, а так же получения спектра мощности. Поэтому важно, чтобы схема пикселизации оптимально удовлетворяла все эти потребности.

В настоящее время алгоритм пикселизации карт неба (метод разбиения неба на участки, в которых по определенным правилам интегрируются наблюдательные данные) является одним из важнейших моментов в теории обработки гауссовых полей на сфере [63].

Тегмарк [64] выделил два критерия, которые можно использовать при выборе правила расположения N точек на сфере:

- минимизация наибольшего расстояния d до ближайшего пиксела (например, от угловых точек до центров пикселов в квадратной сетке);

- сетка должна обеспечивать возможность точного интегрирования в ее узлах.

На сегодняшний день разработано несколько различных методов пикселизации карты неба для исследования протяженного излучения:

- пикселизация на основе икосаэдра,
- пикселизация Иглу,
- иерархическая пикселизация HEALPix,
- схема пикселизации неба GLESP по методу Гаусса–Лежандра.

Первые три метода направлены главным образом на выбор оптимальной формы пикселей и заполнение сферы. Рассмотрим четвертый, т.к. он используется в диссертации.

1.2.1 Пикселизация неба по методу Гаусса–Лежандра

Пикселизация данных СМВ на сфере является лишь частью основной проблемы, состоящей в разложении сигнала СМВ по сферическим гармоникам и получению значений их коэффициентов $a_{\ell m}$.

Схема пикселизации

Коэффициенты $a_{\ell m}$ вычисляются с помощью стандартного разложения карты анизотропии температуры $\Delta T(\theta, \phi)$ по сферическим гармоникам как в уравнении (1.2). Это уравнение удобнее рассматривать в виде:

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi), \quad (1.4)$$

где ℓ — номер сферической гармоники (мультиполя), m — номер моды мультиполя. Для непрерывной функции $\Delta T(\theta, \phi)$ коэффициенты разложения $a_{\ell m}$ вычисляются в соответствии с формулой (1.1). Несколько более сложная схема используется при анализе поляризации СМВ.

Схема пикселизации GLESP, ориентированная прежде всего на гармонический анализ, появилась в 2003 году [65–68]. В отличие от вышеописанных схем, в ней первостепенное значение приобретает точность вычисления интеграла в уравнении (1.1), связанного с координатой θ . Изменился и подход к проблеме обработки данных на сфере, который, в частности, определяет и схему пикселизации.

Для точного вычисления интеграла в (1.1) удобно использовать метод гауссовых квадратур, предложенный Гауссом в 1814 г. и развитый Кристоффелем в 1877 г. Основная идея метода состоит в том, чтобы при интегрировании по x в формуле (1.1) использовать весовые функции $w(x)$ [68] для достижения точного равенства

$$\int_{-1}^1 dx \Delta T(x, \phi) Y_{\ell m}^*(x, \phi) = \sum_{j=1}^N w_j \Delta T(x_j, \phi) Y_{\ell m}^*(x_j, \phi), \quad (1.5)$$

где N — максимальный ранг полинома Лежандра. Здесь и весовая функция $w_j = w(x_j)$, и функция $\Delta T(x_j, \phi) Y_{\ell m}^*(x_j, \phi)$ должны браться в корнях сетки

$$P_N(x_j) = 0. \quad (1.6)$$

Известно, что уравнение $P_N(x) = 0$ имеет точно N нулей в интервале $-1 \leq x \leq 1$. Для метода Гаусса–Лежандра (1.5) весовые коэффициенты даются формулой [68]

$$w_j = \frac{2}{1 - x_j^2} [P'_N(x_j)]^{-2} \quad (1.7)$$

и они могут быть заранее вычислены совместно с набором x_j , например, с помощью процедуры `gauleg` [68]. Применение подобного метода вычисления интеграла (1.1), основанного на квадратуре Гаусса 1.5, позволяет без итераций проводить расчеты, связанные с преобразованием сигнала, с

точностью, ограниченной лишь машинным представлением чисел с плавающей запятой. Такое решение задачи гармонического разложения карт анизотропии температуры и поляризации является наиболее эффективным с точки зрения минимизации вычислительных ошибок по сравнению с другими подходами.

Сетка пикселизации, в которой центры пикселей совпадают с узлами в квадратуре Гаусса–Лежандра, а пиксели имеют квази равные площади, получила название пикселизацией неба по методу Гаусса–Лежандра, или GLESP² [69].

В действительности все данные СМВ имеют некоторый предел разрешения и, следовательно, верхний предел суммирования по ℓ в уравнении (1.5) ограничен: $\ell \leq \ell_{max}$, где ℓ_{max} максимальный мультиполь, принятый при обработке данных на сфере. Это означает, что при построении сетки нулей в точках x_j и весов w_j ($j = 1, 2, \dots, N$) можно использовать $N = N_{max}$, где значение N_{max} связано с ℓ_{max} .

Трапецеидальные пиксели в GLESP ограничены линиями по координатам θ и ϕ , а их центры (по направлению θ) расположены в точках с $x_j = \cos \theta_j$. Таким образом, интервал $-1 \leq x \leq 1$ покрывается кольцами пикселей (число колец N). Угловое разрешение, достигаемое при измерении данных СМВ, определяет верхний предел суммирования в уравнении (1.4), $\ell \leq \ell_{max}$. Чтобы избежать ограничений Найквиста, используется число колец пикселей $N \geq 2\ell_{max}$. Для того, чтобы сделать пиксели в экваториальном кольце (вдоль координаты ϕ) приблизительно квадратными, число пикселей N_ϕ^{max} в этом направлении выбирается как $N_\phi^{max} \simeq 2N$. Число пикселей по другим кольцам, N_ϕ^j , должно определяться из условия задания размеров пикселей равными размерами экваториальных с как можно более высокой точностью.

Согласно предыдущим рассуждениям, схема пикселизации GLESP определяется следующими пунктами:

- в полярном направлении $x = \cos \theta$ задается набор x_j , $j = 1, 2, \dots, N$;

²<http://www.glesp.nbi.dk>

- каждый корень x_j определяет положение кольца N_ϕ с центрами пикселей с ϕ -координатами ϕ_i ;
- все пиксели имеют почти равные площади;
- каждый пиксел имеет вес w_j (см. уравнение (1.7)).

Вычисления, реализованные для схемы GLESP, проведены при следующих условиях:

- Границы всех пикселей проходят вдоль координатных линий θ и ϕ . Таким образом, с большой точностью пиксели являются трапециевидными.
- Число пикселей вдоль азимутального направления ϕ зависит от номера кольца. Число их в кольце программа позволяет выбирать произвольно. Число пикселей зависит от ℓ_{max} , принятого для обработки данных протяженного излучения.
- Для того, чтобы удовлетворить теореме Найквиста, вдоль оси $x = \cos \theta$ число колец должно удовлетворять условию $N \geq 2\ell_{max} + 1$.
- Чтобы экваториальные пиксели были приблизительно квадратными, число пикселей вдоль азимутальной оси ϕ берется как $N_\phi^{max} = \lfloor 2\pi / d\theta_k = 0.5 \rfloor$, где $k = \lfloor N + 1/2 \rfloor$, а $d\theta = 0.5(\theta_{k+1} - \theta_{k-1})$
- Размер каждого пикселя определяется как $S_{pixel} = d\theta_k \times d\phi$, где $d\theta_k$ и $d\phi = 2\pi / N_\phi^{max}$ размеры пикселя в экваториальном кольце.
- Число пикселей N_ϕ^j в j -ом кольце при $x = x_j$ вычисляется как $N_\phi^j = \lfloor 2\pi \sqrt{1 - x_j^2 / S_{pixel}} + 0.5 \rfloor$.
- Полярные пиксели являются треугольными.
- Поскольку число N_ϕ отличается от 2^k , где k — целое, для вычисления быстрого преобразования Фурье вдоль азимутального направления мы применяем код FFTW [70]. Этот код позволяет применять не только подход, в котором используется основание 2 и число точек равно

2^N , но и подходы с другими значениями оснований. Код обеспечивает самую большую скорость вычислений среди доступных в настоящее время процедур.

Глава 2

Методы анализа статистических свойств реликтового излучения

В данной главе дано общее описание методов, которые были использованы в работе. Особенности реализации будут оговорены в разделах, посвященных результатам, которые получены соответствующими методами.

В первую очередь следует отметить корреляционные методы (в частности, метод мозаичной корреляции, раздел 2.1), которые уже давно используются для проверки СМВ на гауссовость [71, 72]. Мы продолжаем пользоваться ими и даем их расширение (разделы 3.4 и 3.1).

Другая группа методов — это эstimаторы (алгоритмы вычисления количественной характеристики). В разделе 2.2 впервые вводятся два новых эstimатора, основанных на анализе углового спектра мощности и предлагается метод локализации их особенностей путем картографирования.

И в завершении этой главы описывается разработанная система анализа одномерных сечений (раздел 2.3) и дается оценка их использования для получения космологических параметров. Эту работу следует рассматривать в качестве методической для апробации пакета `GlesPy` (глава 5), поэтому ее результаты мы не выносим в главу 3.

2.1 Мозаичная корреляция

Впервые метод мозаичной корреляции предложен в работах [73–75] для поиска и анализа остаточных компонент на заданных площадках как возможной причины локального отклонения от статистической изотропии. Он рассчитан как на применение к протяженным данным, так и на работу с точечными источниками в пиксельном пространстве.

В качестве входных данных берутся две карты с одинаковой пикселизацией и равным разрешением. Например, это может быть карта анизотропии реликтового фона ILC WMAP $\Delta T(\theta, \phi)$ с параметрами $2 \leq \ell \leq 100$, $n_x = 201$, $n_p = 402$ (см. раздел 1.2) и карта одной из фоновых компонент, к примеру, карта канала V WMAP — $V(\theta, \phi)$ с теми же параметрами разрешения. Пикселизации этих карты обозначим как $T(\theta_i, \phi_i)$ и $V(\theta_i, \phi_i)$ соответственно, где i — номер пикселя с координатами (θ, ϕ) . Далее на основе этих двух карт строится новая карта (карта мозаичной корреляции) с меньшим разрешением. Пиксели этой карты M_p ($p = 1, 2, \dots, N_0$, где N_0 — полное число пикселей карты). Поскольку разрешение карты мозаичной корреляции меньше разрешения исходных карт, размер ее пикселей будет больше, таким образом пиксел M_p покрывает несколько пикселей каждой исходной карты. Далее пикселу M_p присваивается значение коэффициента корреляции между областями двух исследуемых карт более высокого разрешения, которые он покрывает. Следовательно, он содержит корреляционный коэффициент исходных карт внутри телесного угла Ω_p . Этот телесный угол Ω_p выбирается одинаковым для всех пикселей M_p и определяет угловой масштаб изучения корреляции. Тогда корреляционная карта имеет вид:

$$K(\Omega_p) = \sum_p \sum_{(\theta_i, \phi_i) \in \Omega_p} \frac{(\Delta T(\theta_i, \phi_i) - \langle \Delta T \rangle_{\Omega_p}) (V(\theta_i, \phi_i) - \langle V \rangle_{\Omega_p})}{\sigma_{\Delta T_p} \sigma_{V_p}}, \quad (2.1)$$

где σ_X — соответствующие стандарты.

Данный метод позволяет оценить качество выделения компонент из полного сигнала СМВ, который получают путем обработки многочастотных данных. Остаточный сигнал в результирующей карте может привести к си-

стематическим ошибкам, которые скажутся на точности определения углового спектра мощности в гармонической области [76, 77], а, следовательно, и на точности определения космологических параметров.

На основании этого метода создан обобщенный метод, основанный на пятипараметрической корреляционной функции, рассматриваемый в разделе 3.4.

2.2 Картографирующие эstimаторы

В русском языке термин “эstimатор” встречается не часто и не имеет прямых аналогов, поэтому дадим его определение:

Определение 1. *Эstimатор — правило для вычисления определенной количественной характеристики, основанной на наблюдаемых данных.*

Эstimаторы бывают двух видов — точечные и интервальные. Первые выдают в качестве результата одно значение, которое может быть как скаляром, так и вектором или функцией. Отличие вторых в том, что они выдают ряд вероятных значений.

Для анализа на сфере мы расширяем понятие обычного эstimатора, пользуясь тем свойством реликтового излучения, что, будучи случайным гауссовым полем, каждая его часть (достаточно большая площадка) должна обладать тем же свойством, что и все поле. Поэтому мы можем вычислять эstimатор для любой области размером Ω с координатами (θ, ϕ) и ожидать, что его значение будет слабо зависеть от координат и иметь малый разброс.

Другими словами, мы можем построить новую карту $\Sigma(\theta_i, \phi_i)$ — карту эstimатора, пиксели которой будут содержать значения эstimатора для области с координатами (θ_i, ϕ_i) . Поэтому введенные эstimаторы мы называем *картографирующими*.

Рассмотрим несколько эstimаторов.

2.2.1 Эстиматор стандартного отклонения углового спектра мощности

В качестве эстиматора можно использовать статистический стандарт σ спектра мощности.

Одним из основных космологических параметров является так называемый *спектральный индекс* n_S . Инфляционная теория предсказывает плоский спектр ($n_S = 1$) — **спектр Харрисона–Зельдовича**.

Как сказано в [78]

На стадии инфляции из квантовых флуктуации скалярного поля рождаются возмущения плотности. Квантовые флуктуации, которые обычно проявляются только в микроскопических масштабах, в экспоненциально расширяющейся Вселенной быстро увеличивают свой размер и амплитуду и становятся космологически значимыми. Таким образом, можно сказать, что скопления галактик и сами галактики являются макроскопическими проявлениями квантовых флуктуаций. При этом формируется спектр возмущений плотности, называемый спектром Харрисона–Зельдовича, или масштабно-инвариантным спектром возмущений (термин “масштабно-инвариантный” означает, что соответствующая величина изменяется пропорционально росту линейных размеров расширяющейся Вселенной).

Согласно же [79], наличие постороннего излучения, например, в плоскости Галактики, искажает спектр, делая его пилообразным. Также влияет на угловой спектр мощности и экранирование областей. Примеры спектров мощности приведены на рисунке 3.15 раздела 3.3, посвященному результатам приложения эстиматоров.

2.2.2 Эстиматор стандартного отклонения разности спектров мощности

В качестве еще одного эстиматора мы предлагаем также стандарт, но не самого спектра мощности, как для предыдущего случая, а разности спек-

тров мощности двух различных областей. Исходя из свойств гауссового поля, которые обсуждались выше в главе 2.2.1, спектр мощности должен быть плоским, поэтому разность спектров мощности двух полушарий должна иметь значения близкие к нулю и, следовательно, как и в предыдущем случае, малый разброс значений. Поэтому данный эстиматор имеет место в анализе гауссовости реликтового излучения.

2.2.3 Эстиматор вклада четных гармоник

Третий эстиматор, который мы использовали, был предложен в работе [46]. Он основывается на оценке вклада четных гармоник в угловой спектр мощности, которая осуществляется следующим образом:

$$P = P^+ / P^-, \quad (2.2)$$

$$P^+ = \sum_{\ell_{even}} \ell(\ell + 1)C_{\ell}, \quad (2.3)$$

$$P^- = \sum_{\ell_{odd}} \ell(\ell + 1)C_{\ell}, \quad (2.4)$$

где P^+ определяет вклад четных гармоник, где P^- — нечетных гармоник. Картографирование данного эстиматора осуществляется, как и двух предыдущих, за счет вычисления углового спектра мощности по заданной области, вместо всей сферы.

2.3 Фурье–образы одномерных сечений

Для анализа реликтового излучения можно использовать, не только полные карты, но и одномерные срезы сигнала. В этом случае математический аппарат, который использует сферические функции, становится неприменим. Поэтому он уступает место Фурье–анализу. Мы создали систему анализа данных одномерных сечений и испытали ее при исследовании влияния космологических параметров с процедурой разделения компонент на Фурье–образы одномерных данных. В этом же разделе будут описаны и результаты ее апробации.

2.3.1 Система анализа Фурье–образов одномерных сечений

Помимо полных обзоров неба, которые стали доступны благодаря WMAP и Planck, существует множество обзоров, которые нацелены на получения данных микроволнового фона внутри небольшого кольца (одномерные сечения). Целая группа методов применяется для их изучения:

- гармонический анализ [80],
- корреляционные методы [71, 72],
- кластерный анализ [81, 82],
- топологические методы [83],

Хотя между Фурье–образами одномерных сечений и гармоническими данными по всему небу нет прямой связи, большой интерес представляет изучение влияния космологических параметров на поведение одномерного сигнала. Также важным моментом является исследование возможности оценки космологических параметров после процедуры разделения и удаления фоновых и галактических компонент, поскольку данный подход может быть применен для исследования космического микроволнового фона на RATAN-600 [84–86], в космическом проекте “Миллиметрон”¹ и при анализе других неполных обзоров неба.

Ранее уже предпринималось теоретическое исследование проблемы зависимости одномерного распределения анизотропии от некоторых космологических параметров [81]. В данной работе исследовалась аналогичная задача. Однако поиск ее решения проводился с помощью моделирования методом Монте–Карло с включением процедур разделения компонент.

Входные данные

Для анализа было использовано сечение $\delta \sim 41^\circ$, соответствующее исследуемой области обзора RATAN-600 Zenith Field (RZF), который посвя-

¹<http://asc-lebedev.ru>

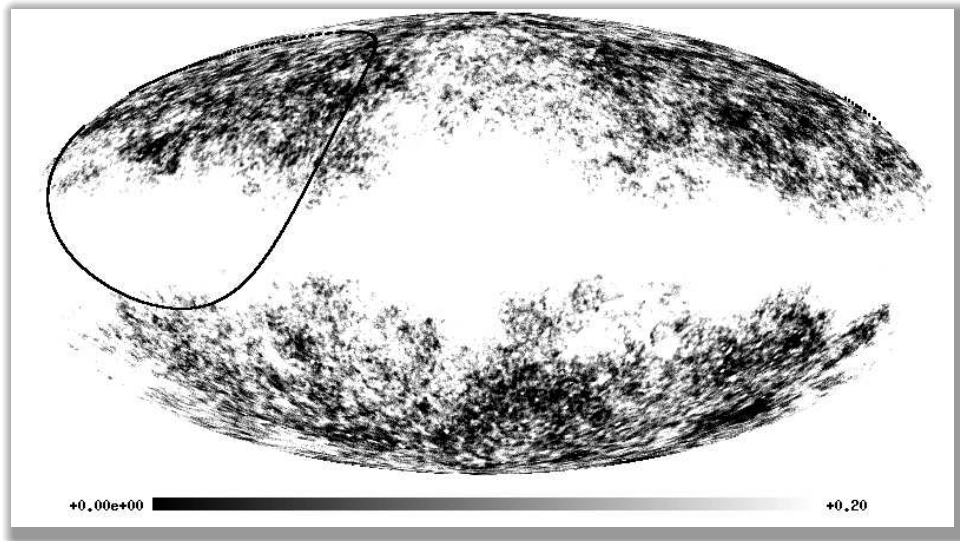


Рисунок 2.1: Область одномерного сечения на склонении $\delta \sim 41^\circ$ на карте WMAP канала K (23 GHz) в галактической системе координат. Верхний уровень отображения составляет 0.2 мК, чтобы подчеркнуть область Галактического излучения [88].

щен наблюдению как яркости неба в сантиметровом диапазоне, так и изучению статистических свойств радиисточников [87]. Эта область (рисунок 2.1) очень хорошо подходит по двум причинам:

1. Это сечение два раза проходит через плоскость Галактики,
2. С учетом синхротронного излучения оказывается, что почти половина радиосигнала приходит из Млечного Пути.

Данная область уже изучалась по данным WMAP, и в ней была обнаружена антикорреляция сигнала карты ИС и галактических фоновых компонент. Эта антикорреляция наблюдается не только в распределении корреляционных коэффициентов в карте и моделях, но и в соответствующих сечениях компонент излучения.

Для моделирования процедуры разделения компонент использовались данные 7-го года наблюдений каналов Q (41 ГГц) и V (61 ГГц) космическо-

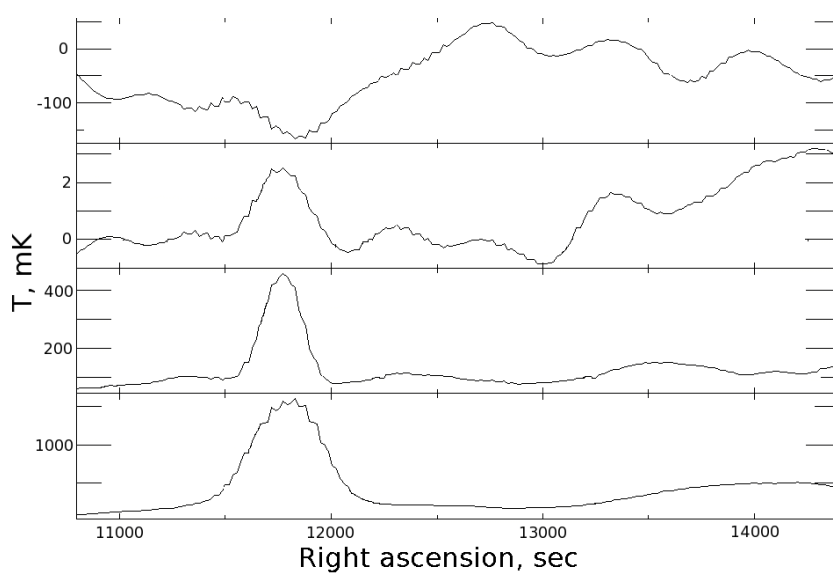


Рисунок 2.2: Сечения неба на склонении $\delta \sim 41^\circ$.
На верхнем графике данные СМВ WMAP. На трех нижних данные пыли, свободно-свободного и синхротронного излучения соответственно. Максимум на распределении соответствует плоскости Галактики. На СМВ же наблюдается локальный минимум излучения [71].

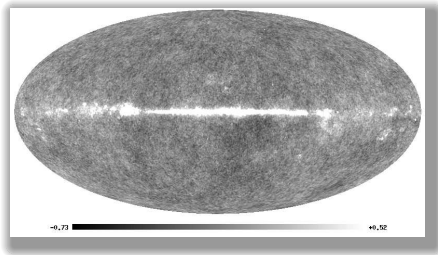


Рисунок 2.3: Карта канала Q WMAP с разрешением $n_x = 2049, n_p = 4098$ [88].

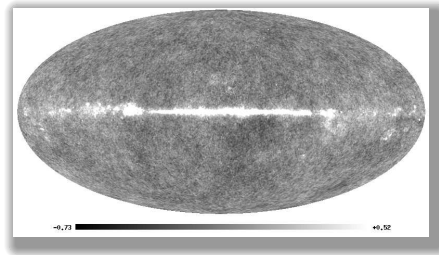


Рисунок 2.4: Карта канала V WMAP с разрешением $n_x = 2049, n_p = 4098$ [88].

го эксперимента WMAP, которые предоставлены в свободном доступе на сайте Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis (LAMBDA)². Карты этих каналов приведены на рисунках 2.3 и 2.4.

Для анализа излучения на сфере применялся пакет GLESP [69]. Случайные гауссовы поля генерировались с помощью процедуры `s12map` [89].

Для построения теоретических спектров мощности с заданными космологическими параметрами $C_\ell(\Omega_\Lambda, \Omega_b, \Omega_{CDM}, H_0, n_s, \dots)$ использовался пакет Code for Anisotropies in the Microwave Background (CAMB)³ [90], который в свою очередь основан на процедуре CMBFAST [91].

Алгоритм работы

Алгоритм анализа влияния варьирования космологических параметров на спектры одномерных сечений с разделением компонент состоит из следующих шагов:

1. выбор космологических параметров;
2. вычисление углового спектра мощности реликтового излучения, который соответствует параметрам модели;
3. моделирование случайных гауссовых карт по данным вычисленного углового спектра мощности;

²<http://goo.gl/aMr8Od>

³<http://camb.info/>, <http://goo.gl/zzSlZP> — online.

4. имитация наблюдаемого сигнала одного из каналов через добавление к модельной карте одной из реальных фоновых компонент;
5. повтор предыдущего шага с добавлением других фоновых компонент;
6. разделение компонент по картам, полученным на двух предыдущих шагах;
7. построение одномерного сечения карты;
8. вычисление спектра мощности сечения;
9. оценка доверительного интервала методом Монте–Карло.

При вычислении углового спектра мощности пакетом SAMB использовалась стандартная Λ CDM–космологическая модель [92].

Варьировались следующие три параметра:

- $\Omega_b + \Omega_{CDM}$ — сумма соотношений плотности барионной и холодной темной материи;
- Ω_Λ — плотность темной энергии;
- n_S — показатель спектра мощности первичных возмущений плотности;

Сумма $\Omega_b + \Omega_{CDM}$ задавалась равной 0.3 и варьировался первый из параметров в диапазоне [0.01, 0.3]. Плотность темной энергии Ω_Λ принимала значения из промежутка [0.0, 1.0], а спектральный индекс первичных возмущений n_S — [0.0, 2.0]. В приведенных интервалах строилась сетка из 100 шагов. На рисунке 2.5 представлены некоторые ($\Omega_b = 0.1$ отмечен сплошной линией, $\Omega_\Lambda = 0.5$ — пунктиром, $n_S = 0.5$ — штрих-пунктиром) вычисленные спектры мощности. Поскольку мы применяли простую схему варьирования параметров, где одновременно изменялась только одна величина, все остальные параметры соответствуют Λ CDM–модели.

Для получения реальных фоновых компонент F_i , используемых в процессе моделирования, мы вычитали из исходного сигнала канала S_i карту WMAP ILC из описанного выше архива с угловым разрешением $\ell_{max} = 100$

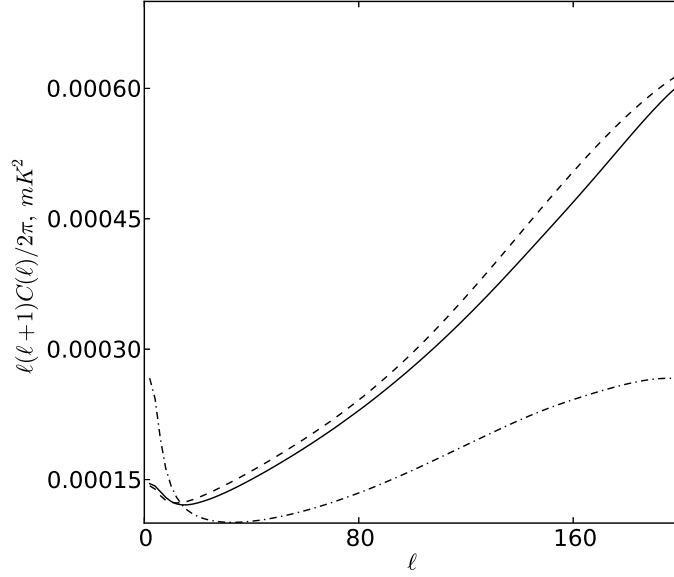


Рисунок 2.5: Модельный спектр мощности для трех космологических моделей. Случай $\Omega_b = 0.1$ отмечен сплошной линией, $\Omega_\Lambda = 0.5$ — пунктиром, $n_s = 0.5$ — штрих-пунктиром [88].

($n_x = 201, n_p = 402$). Таким образом карты F_i содержали как галактические, так и внегалактические фоновые компоненты.

Для разделения компонент мы применяли метод подвыборок гистограммы с пикселей с близкими весами в пиксельной области [93]. В этом методе наблюдаемый сигнал записывается как сумма СМВ и фоновых компонент:

$$S_1(p_i) = C(p_i) + F_1(p_i), S_2(p_i) = C(p_i) + F_2(p_i),$$

Тогда искомый сигнал СМВ можно представить как

$$\begin{aligned} C(p_i) &= \alpha S_1(p_i) + (1 - \alpha) S_2(p_i) \\ &= S_2(p_i) + \alpha (S_1(p_i) - S_2(p_i)) \end{aligned}$$

Для наблюдаемого сигнала вводится функция однородности:

$$G_i = G(p_i) = G(S_1(p_i), S_2(p_i))$$

для разбиения гистограммы сигнала на однородные бины. И для j -ого бина имеем

$$j \leq G_i/\Delta \leq j + 1$$

для всех пикселей p_i из j -ого бина, Δ — ширина бина. В каждом таком бине можно вычислить α_j и отделить реликтовое излучения от других фоновых компонент. Следуя рекомендации [93], мы провели разделение компонент с функцией однородности, основанной на разности сигнала в каналах:

$$\begin{aligned} G_i = S_1(p_i) - S_2(p_i) &= F_1(p_i) - F_2(p_i) = \beta_j(1 + \delta_i), \\ \langle \delta_i \rangle &= 0, \quad |\delta_i| \leq \Delta/\beta, \end{aligned}$$

где β_j — среднее значение для j -ого бина, а δ_i — отклонение от среднего значения для i -ого пикселя. В этом случае СМВ представляется в виде:

$$C(p_i) = S_2(p_i) - (1 + \delta(p_i))\langle S_2\delta \rangle / \langle \delta^2 \rangle$$

Размер бина мы выбирали так, чтобы его длина была не меньше $\Delta \geq 0.02$ и в него попадало не менее пяти пикселей. На рисунках 2.6 и 2.7 представлены модельные карты до и после разделения компонент соответственно. Для каждого из наборов космологических параметров было смоделировано 100 случайных карт для определения 1σ -разброса. На рисунке 2.8 изображены примеры спектров мощности для одномерных сечений некоторых космологических моделей ($\Omega_b = 0.0462$, $\Omega_\Lambda = 0.735$ и $n_s = 0.96$). Сплошной линией отмечено среднее значение для 100 случайных моделей. Серый фон отображает 1σ -разброс. Пунктир соответствует сечению карты ILC WMAP.

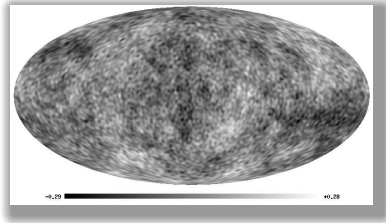


Рисунок 2.6: Пример модельной карты для $\Omega_b = 0.01$ до разделения компонент [88].

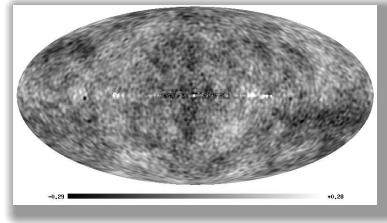


Рисунок 2.7: Пример модельной карты для $\Omega_b = 0.01$ после разделения компонент [88].

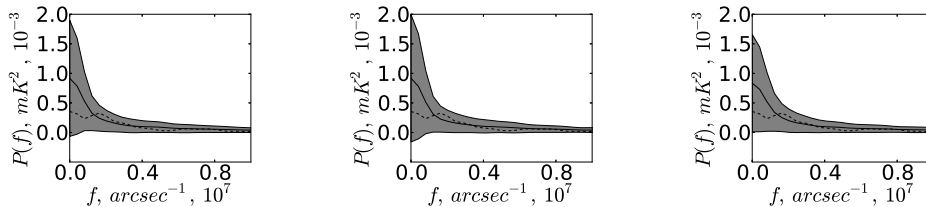


Рисунок 2.8: Примеры спектров одномерных сечений для некоторых значений космологических параметров (слева направо соответственно $\Omega_b = 0.0462$, $\Omega_\Lambda = 0.735$ и $n_s = 0.96$). Спектры построены для модельных данных без добавления фоновых компонент и их выделения. Сплошной линией отмечено среднее значение для 100 случайных моделей. Серый фон отображает 1σ -разброс. Пунктир соответствует сечению карты ILC WMAP [88].

Моделирование показало, что спектры мощности одномерных сечений не проявляют большой чувствительности к варьированию космологических параметров даже в достаточно широком диапазоне на разрешении $\ell_{max} = 100$ ($n_x = 201$, $n_p = 402$). Однако, процедура разделения компонент оказывает достаточно слабое воздействие на него [88]. Была проведена аналогичная работа для различных диапазонов гармоник, поскольку низкочастотные компоненты могут искажать сигнал более высоких, а многие эксперименты по одномерным сечениям получают данные именно на большом разрешении. Кроме того, было рассмотрено отдельно влияние космологических параметров для четных и нечетных мультиполей исходных карт ($\ell + m$ кратны двум). Оказалось, что ни для четных, ни для нечетных, ни для высокочастотных ($90 \leq \ell \leq 120$) карт космологические параметры не оказывают влияния на спектры одномерных сечений [94].

Глава 3

Исследование статистических аномалий

В этой главе обсуждаются методы, которые описаны в главе 2, и результаты их использования. В каждом разделе даются особенности реализации методов.

Изложение результатов начинается с работы, посвященной осевым симметриям в данных WMAP ILC, в которой используются корреляционные коэффициенты пар симметричных областей. Показано, что в выбранных областях при вычитании низких мультиполей значения корреляционных коэффициентов превосходит уровень 2σ по сравнению с моделями.

Раздел 3.2 посвящен мозаичной корреляции между данными WMAP и каталогов точечных инфракрасных и субмиллиметровых источников. В работе выявлено, что интегральный эффект Сакса–Вольфа и Магелланов Поток отражаются в низких мультиполях корреляционных карт CMB с перечисленными источниками.

Результаты реализации предложенных эстиматоров (раздел 2.2) даны в разделе 3.3. Как оказалось, полюса (пятна) диполя Σ_1 карты (карты, построенной по эстиматору стандартного отклонения σ спектра мощности C_ℓ) совпадают с полюсами эклиптики.

И заключает эту главу исследование корреляции между данными ILC WMAP, Two Micron All-Sky Surve (2MASS) и SDSS, в котором мы вво-

дим пятимерную корреляционную функцию. С помощью предложенного метода удастся оценить наибольший масштаб ячейки неоднородности на различных красных смещениях.

3.1 Осевые симметрии в данных WMAP ILC

В данном разделе проведен анализ гауссовости микроволнового фона по данным WMAP ILC с помощью вычисления корреляции некоторых зон. Тест основан на анализе гармоник в зонах, расположенных симметрично относительно некоторой плоскости. В галактической и эклиптической координатных системах выделены и исследованы такие зоны на предмет наличия антикорреляции. Для некоторых зон обнаружены негауссовы свойства.

3.1.1 Обоснование

В работе [45] говорится, что канал V содержит наиболее сильный сигнал реликтового фона относительно других галактических компонент. Т.к. дипольная компонента Галактики является четной, большая часть галактического фона попадает в четные гармоники (четность гармоник определяется четностью суммы $\ell + m$). Таким образом микроволновый фон после вычитания галактических компонент становится нечетным.

Используя карту нечетных мультиполей канала V, можно выделить антисимметричные области (области, которые расположены симметрично относительно экватора, но имеют противоположное значение). Наличие таких зон обсуждалось в [95,96]. На рисунке 3.1 приведены нечетные карты канала V и ILC WMAP. Визуальное сравнение этих карт позволяет обнаружить такие зоны (рисунок 3.2).

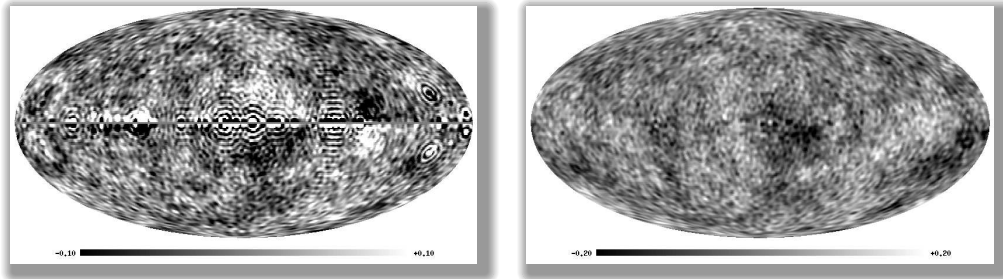


Рисунок 3.1: Карта нечетных гармоник канала V (слева) и ILC (справа) WMAP [97].

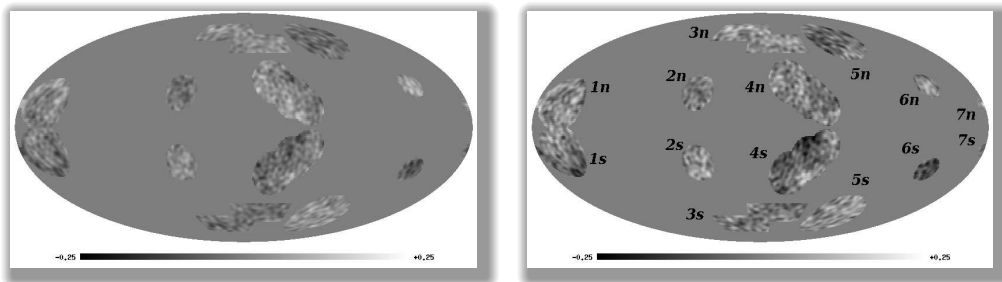


Рисунок 3.2: Отобранные зоны в галактической системе координат. Слева только нечетные гармоники, справа все гармоники карты ILC WMAP $\ell \leq 100$ [97].

В таблице 3.1 даются параметры пар симметричных зон — их форма и положения на северном и южном полушариях. Для круглых зон первые два параметра — это координаты в галактической системе координат, третий — радиус. Для прямоугольных зон данных по две пары координат их углов. Через “/” обозначаются аналогичные координаты для симметричных зон.

3.1.2 Алгоритм анализа данных

Мы будем пользоваться разложением анизотропии реликтового фона в виде (1.4).

Поскольку мы выделяем зоны определенного размера, вклад низких мультиполей на них падает, а высоких, наоборот, растет. Вычитая определенные гармоники, удастся выделить основные мультиполи разложения

Таблица 3.1: Номера пар зон в галактических координатах, их форма и координаты: “с” - круг (параметры $lat/-lat$, lon , $radius$ соответственно), “r” — прямоугольник (параметры $lat1/-lat1$, $lon1$, $lat2/-lat2$, $lon2$ соответственно), где (lat, lon) — галактические широта и долгота и “-lat” — широта симметричной зоны. Несколько площадок под одним номером обозначают комбинированную зону.

Пара	Форма	Координаты
1	с	$15^\circ/-15^\circ$, 160° , 17°
2	с	$23^\circ/-23^\circ$, 52° , 12°
3	r	$75^\circ/-75^\circ$, 60° , $60^\circ/-60^\circ$, $-15d$
	r	$65^\circ/-65^\circ$, 15° , $50^\circ/-50^\circ$, $-50d$
4	с	$30^\circ/-30^\circ$, -25° , 15°
	с	$20^\circ/-20^\circ$, -40° , 15°
	с	$13^\circ/-13^\circ$, -52° , 12°
5	с	$60^\circ/-60^\circ$, -90° , 15°
6	с	$27^\circ/-27^\circ$, -141° , 8°
7	с	$15^\circ/-15^\circ$, -179° , 4°

и определить гармонические корреляционные свойства симметричных зон. Корреляционные коэффициенты для зон рассчитывались по формуле 2.1. Отличие от метода мозаичной корреляции (см. главу 2.1) в том, что области могли иметь произвольную форму, а корреляционные коэффициенты не картографировались, корреляция вычислялась для симметричных областей одной и той же карты.

Для оценки доверительного интервала было сгенерировано 100 реализаций случайного гауссова поля возмущений в космологической модели Λ CDM [92] с помощью пакета GLESP [65, 69, 89].

3.1.3 Результаты

На рисунке 3.3 приведены результаты вычисления корреляционных коэффициентов для первой зоны при вычитании одного мультиполя. На оси абсцисс отложен номер вычитаемого мультиполя, на ординате — корреляционные коэффициенты. Пунктиром указано среднее значение и 1σ разброс

по результатам моделирования в Λ CDM–космологии. Как видно, при вычитании низких мультиполей ($\ell = 5, 6, 7$) антикорреляция данной области сильно возрастает и достигает уровня 2σ , что является существенным показателем антисимметричности и, как следствие, негауссовости этих зон. Эти подавляющие корреляцию гармоники сформированы сигналом из галактической плоскости, что демонстрируется графиком на рисунке 3.4.

Результаты опубликованы в [97]

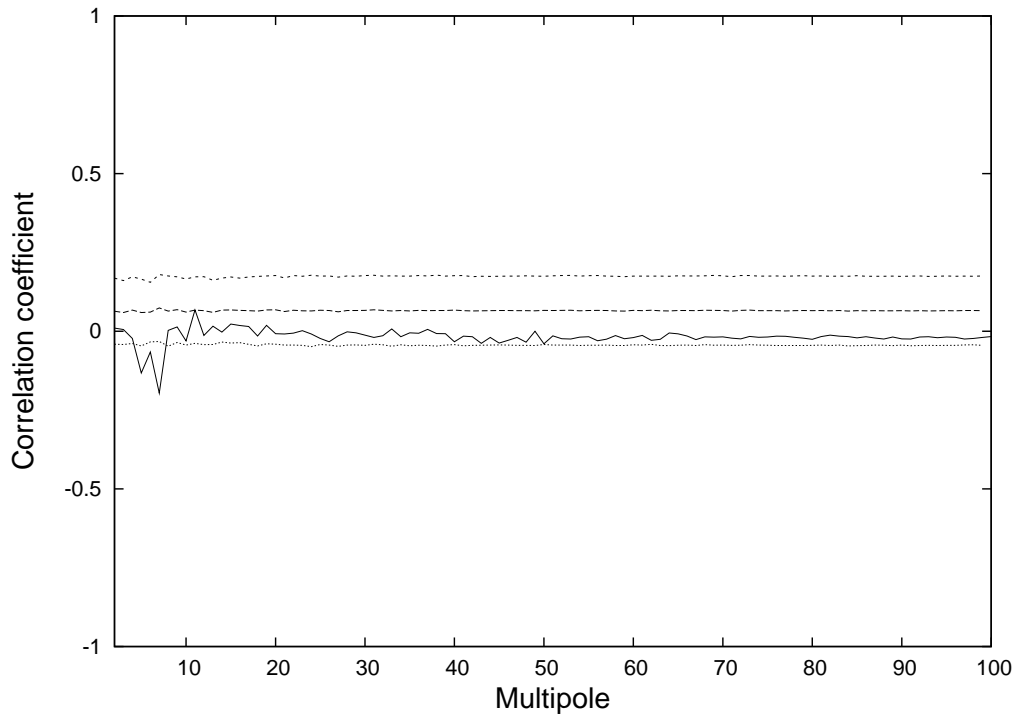


Рисунок 3.3: Результат корреляции для первой области в галактических координатах с удалением одного мультиполя. По оси абсцисс указан номер вычтенного мультиполя. На оси ординат отложены коэффициенты корреляции. Штрихованными линиями указано среднее значение и границы на уровне 1σ для аналогичных модельных данных в Λ CDM–космологии [97].

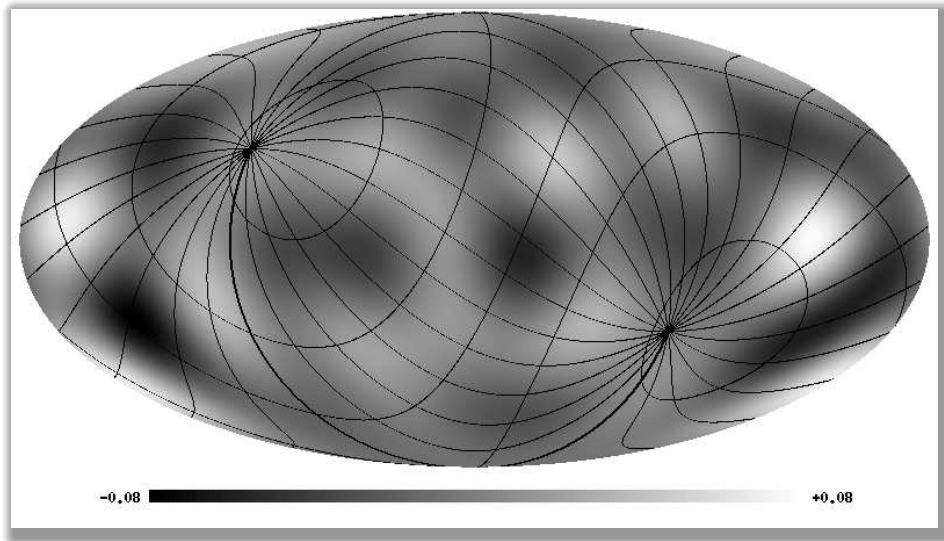


Рисунок 3.4: Карта мультиполей $l = 5, 6, 7$ из данных CMB ILC в галактической координатной системе. На изображение наложена сетка эклиптической системы координат [98].

3.2 Влияние инфракрасных и субмиллиметровых источников на микроволновый фон

При выделении реликтового фона из наблюдательных данных в разных каналах необходимо чистить полученную карту от сигнала точечных источников, который может быть причиной проявления статистической анизотропии. Однако учесть все источники радиоизлучения на небе крайне сложно. Кроме того, интересным является и исследование влияния источников, которое являются признаком протяженного излучения, т.к. они могут служить показателями источников другой природы, например, пылевых облаков, которые не были учтены при обработке фоновых компонент.

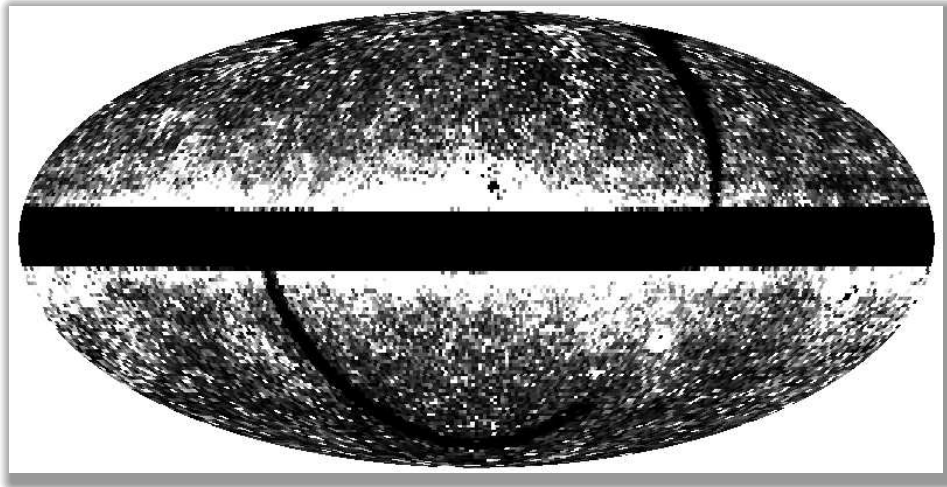


Рисунок 3.5: Положение объектов каталога FSC на сфере в галактических координатах. Показаны источники на длине волны $100 \mu\text{m}$. Полоса в плоскости Галактики $|b| < 10^\circ$ экранирована [98].

3.2.1 Используемые данные

Мы изучали корреляцию карты ILC WMAP седьмого года наблюдений с разрешением $2 \leq \ell \leq 100$ ($n_x = 201$, $n_p = 402$) с источниками различных каталогов. Ниже дано краткое описание использованных каталогов.

Каталог слабых источников миссии InfraRed Astronomical Satellite (IRAS)

В 1983 году космический телескоп IRAS провел обзор неба в четырех каналах $12 \mu\text{m}$ (25 THz), $25 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$ и $100 \mu\text{m}$ (3 THz). В результате был получен каталог точечных источников PCCS более, чем 240 000 объектов [99]. Каталог слабых источников этого обзора FSC содержит около 230 000 объектов и имеет достоверность порядка 99%, на $12 \mu\text{m}$ и $25 \mu\text{m}$, 80% на $60 \mu\text{m}$ и $100 \mu\text{m}$. На рисунке 3.5 представлены положения объектов FSC.

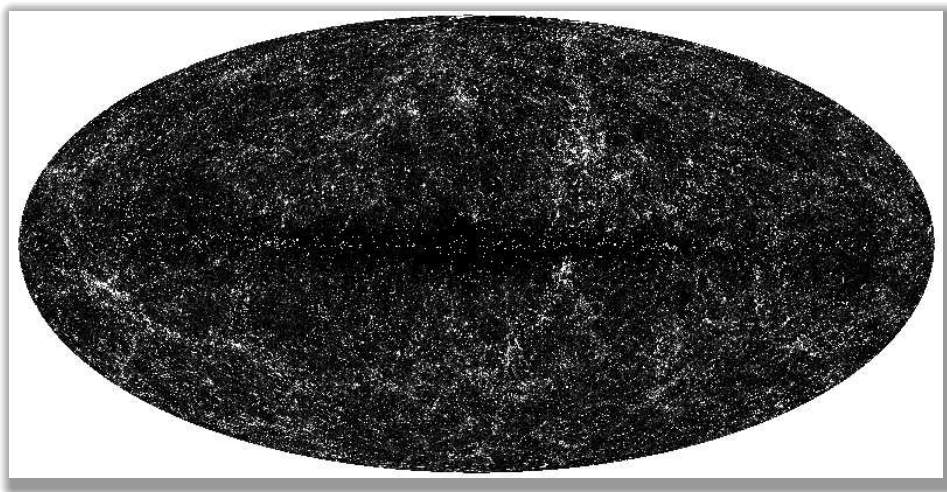


Рисунок 3.6: Карта объектов 2MASX в галактической системе координат [98].

Каталог 2MASX

Каталог всего неба 2MASS [100] получен в результате обзора, проведенного на 1.3m телескопах обсерваторий Mt. Hopkins (Arizona) и Cerro Tololo (Chile), и включает каталог более чем 470 000 000 точечных объектов Point Source Catalog (PSC) и каталог протяженных источников eXtended Source Catalog (XSC) (или 2MASX), содержащий 1 647 599 объектов, преимущественно галактик ($\sim 90\%$) в трех цветовых полосах: J ($\leq 15^m1$), H и Ks ($\leq 13^m5$). 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 рисунке 3.6.

Каталог миссии Planck

Используемая версия каталога источников, обнаруженных миссией Planck [101], получена в результате картографирования полной сферы плюс 60% всего неба за второй год миссии. Полный каталог содержит источники, из 9 частотных каналах: 30 GHz, 44 GHz, 70 GHz, 100 GHz, 143 GHz,

217 GHz, 353 GHz, 545 GHz и 857 GHz. Соответствующие пределы обнаружения на уровне 10σ составили для широт $|b| > 30^\circ$ 0.49 Jy, 1.0 Jy, 0.67 Jy, 0.5 Jy, 0.33 Jy, 0.28 Jy, 0.25 Jy, 0.47 Jy и 0.82 Jy. Каталог включает:

- звезды с пылевыми оболочками,
- радиогалактики,
- блазары,
- яркие инфракрасные галактики,
- холодные молекулярные облака,
- особенности галактической межзвездной среды,
- кандидаты в скопления
- с эффектом Зельдовича–Сюняева
- и неклассифицируемые источники.

Расположение источников на небе показано на рисунке 3.7.

3.2.2 Алгоритм обработки

Для анализа данных использовался обычный метод мозаичной корреляции (см. главу 2.1). Карты точечных источников перед процедурой вычисления корреляционных коэффициентов приводились к одному разрешению путем сглаживания в гармоническом пространстве гауссианой с полушириной $\theta = 10^\circ$ (также мы использовали и другие полуширины, но их результаты не показали ничего интересного). Далее будем обозначать карты корреляции как X vs ILC для корреляции карты X и карты ILC.

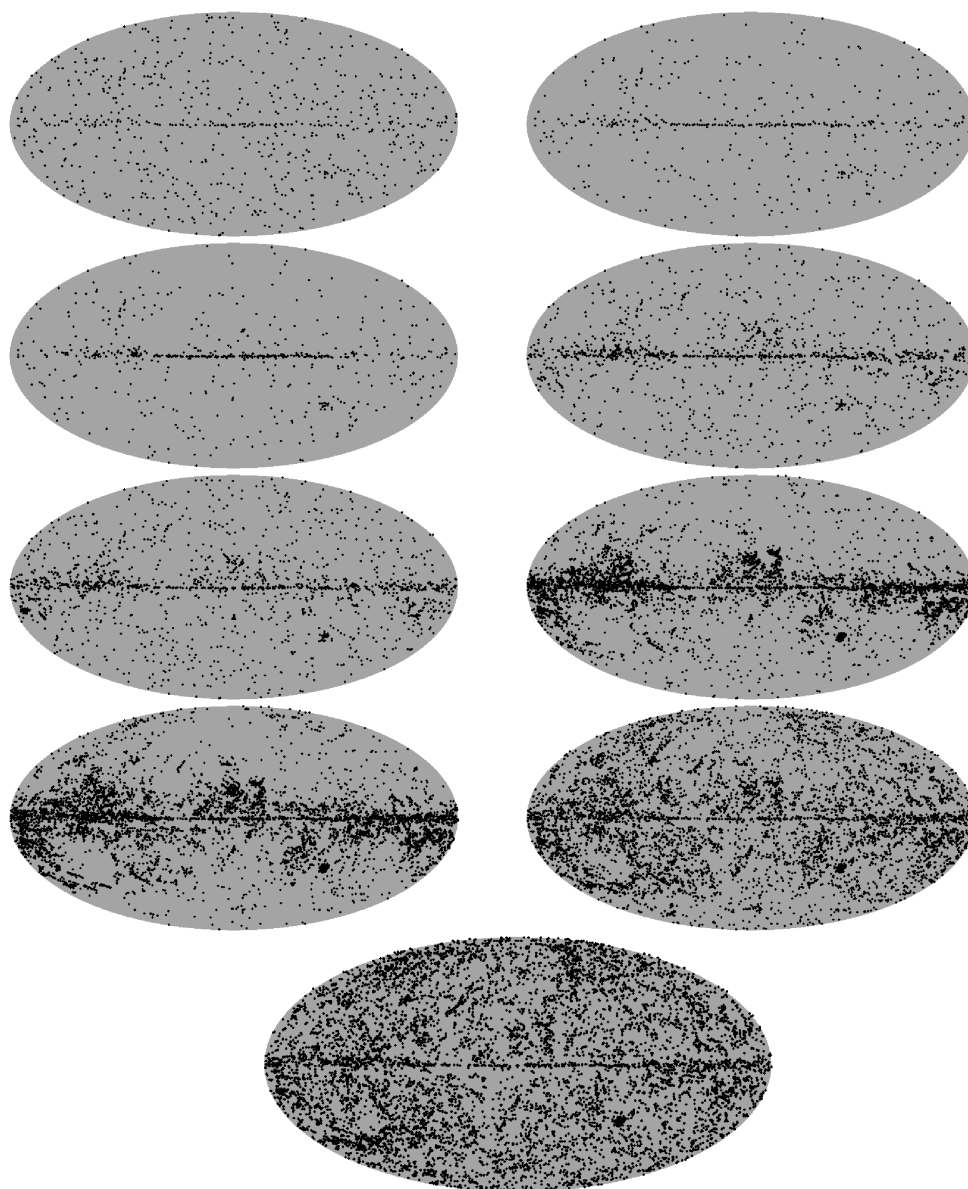


Рисунок 3.7: Положение источников каталога Planck на сфере в галактических координатах. Справа налево сверху вниз источники на частотах 30 GHz (705 объектов), 44 GHz (452), 70 GHz (599), 100 GHz (1381), 143 GHz (1764), 217 GHz (5470), 353 GHz (6984), 545 GHz (7223) и 857 GHz (8988 объектов) [98].

3.2.3 Результаты

На рисунке 3.8 представлены спектры мощности карт мозаичной корреляции Planck vs ILC. На этих графиках хорошо видно, что некоторые гармоники выходят по амплитуде за пределы 1σ -разброса. Рассмотрим их более детально.

Выделенные мультиполи

На спектрах мощности карт мозаичной корреляции Planck vs ILC (рисунок 3.8) есть мультиполи, амплитуда которых выходит за 1σ -разброс, который получен по результатам моделирования 100 реализаций случайного гауссова поля возмущений в космологической модели Λ CDM. Практически на всех графиках (с одним окном корреляции) гармоники с номерами $\ell = 3$, $\ell = 6$ имеют очень высокое значение. На рисунке 3.9 изображены шестые гармоники $\ell = 6$ карты корреляции FSC vs ILC, Planck vs ILC и самой ILC. Две верхние с эклиптической сеткой координат. Видно, что этот мультиполь почти во всех картах имеет одну и ту же структуру, а его пики отражают плоскость эклиптики.

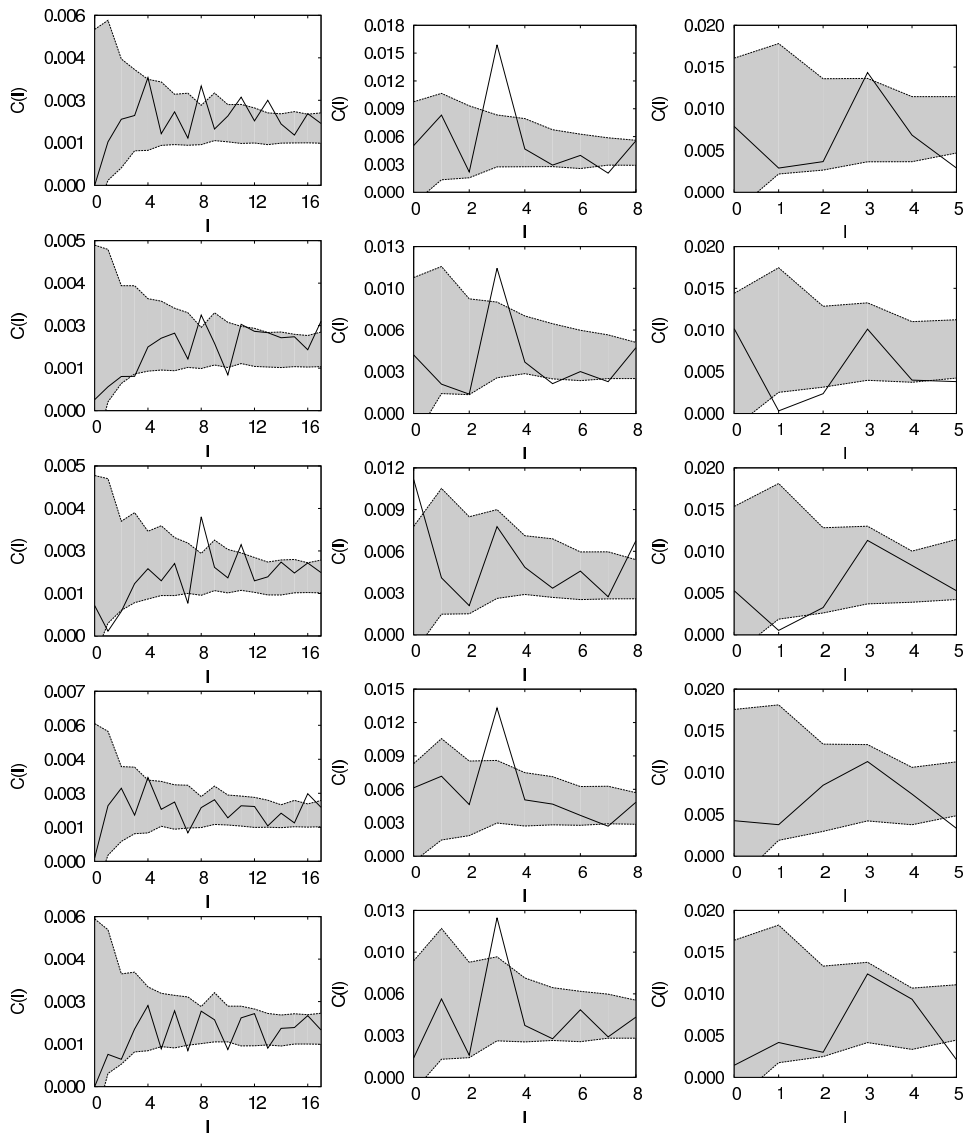


Рисунок 3.8: Угловые спектры мощности карты корреляций данных Planck и ILC WMAP для различных корреляционных окон (левый столбец $300'$, центральный $600'$, правый $900'$; в строках данные для частотных каналов на 30 GHz, 44 GHz, 70 GHz, 100 GHz, 143 GHz). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных Planck с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели [98].

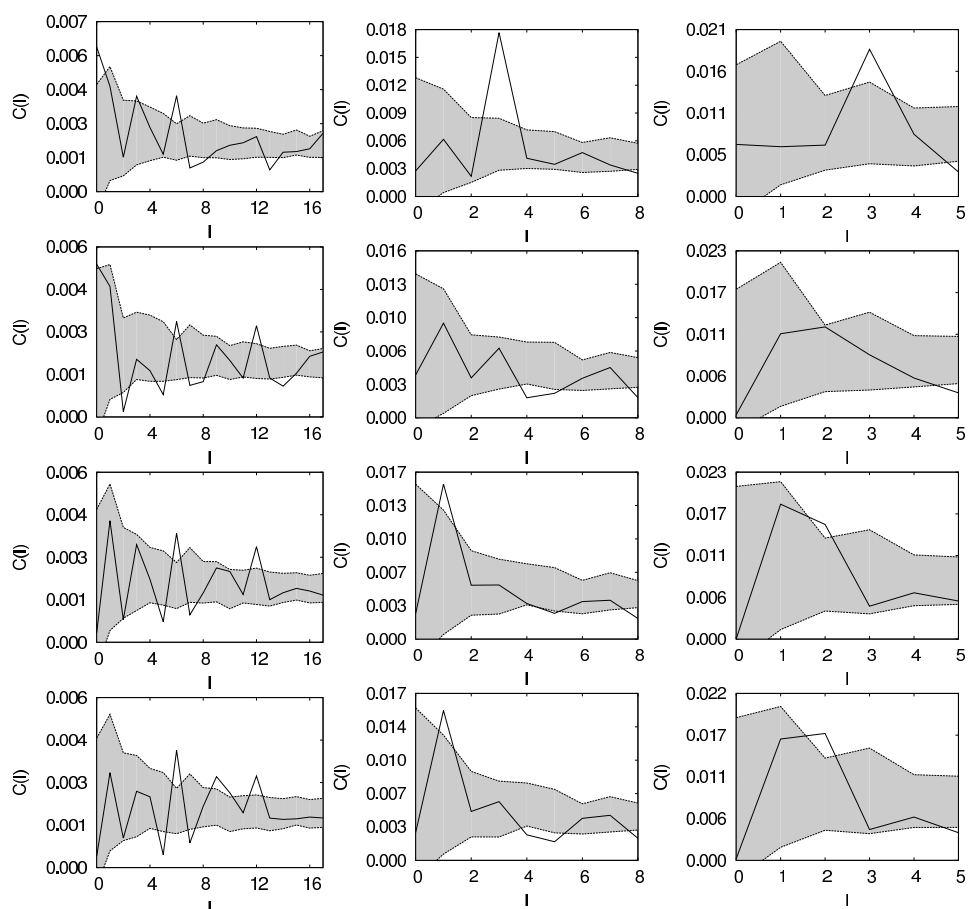


Рисунок 3.8: продолжение. Данные для 217 GHz, 353 GHz, 545 GHz, 857 GHz [98].

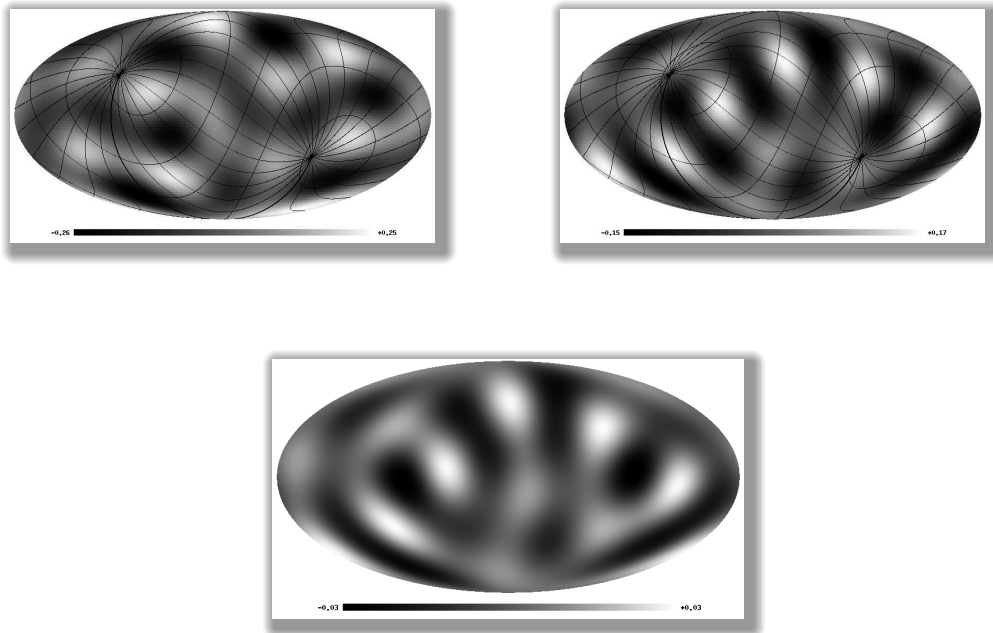


Рисунок 3.9: Шестая гармоника $\ell = 6$ различных карт: сверху слева корреляционной карты FSC vs ILC (с эллиптической координатной сеткой), сверху справа корреляционной карты Planck vs ILC (с эллиптической координатной сеткой), снизу карты ILC WMAP [98].

Чтобы убедиться в значимости этих результатов, мы сделали оценку вероятностей достижения уровня в 1σ , 2σ и 3σ , которую мы приводим в таблице 3.2.

Таблица 3.2: Вероятности случайного появления мощных гармоник в корреляциях исследуемых каталогов с картами случайного гауссова поля CMB в космологии Λ CDM.

Канал	Размер окна, arcmin	ℓ	Вероятность
Band	2MASS		
Ks	300	12	0.183
Ks	600	4	0.117
GHz	Planck		
30	600	3	0.084
30	900	3	0.098
44	300	11	0.057

Продолжение таблицы 3.2

Канал	Размер окна, arcmin	ℓ	Вероятность
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

Схожесть шестой гармоники $\ell = 6$ наводит на мысль о существовании некоторой структуры, связанной с эклиптической на соответствующем масштабе ($\ell \sim 13.5^\circ$). Еще одним мультиполем с интересным поведением является $\ell = 4$ при корреляции 2MASX vs ILC. На рисунке 3.10 мы приводим его карту и карту эффекта Сакса–Вольфа по данным работы [102]. Здесь видно, что в южном полушарии положения пиков обеих карт практически полностью совпадают. Интересно отметить, что карта сигнала эффекта Сакса–

Вольфа построена по тем же данным — 2MASX и ILC WMAP. Параллельность сигнала SWE плоскости Галактики может быть вызвана корреляционными свойствами (неполнотой информации в 2MASX и выделенностью плоскости Галактики в ILC WMAP), которые были обнаружены в данном исследовании.

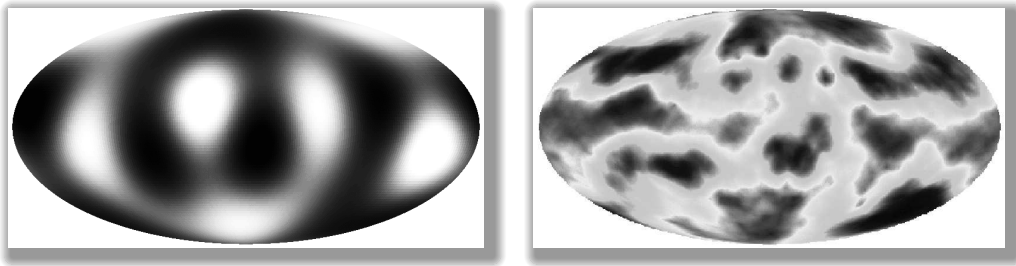


Рисунок 3.10: Слева гармоника $\ell = 4$ карты корреляции 2MASX vs ILC [98], справа карта эффекта Сакса–Вольфа по данным [102].

Из всех гармоник по амплитуде наиболее выделяется $\ell = 3$ при корреляции Planck vs ILC. Также интересно отметить сходство (положение, форма и направление) этого октуполя с Магеллановым Поток, наблюдаемым на 21 см и протянутым на небе $\sim 200^\circ$ [103], что изображено на рисунке 3.11.

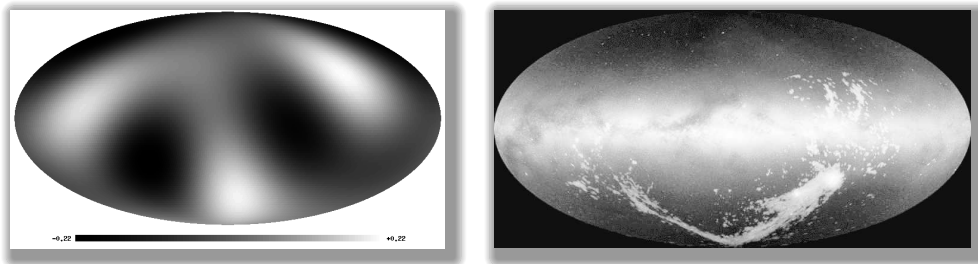


Рисунок 3.11: Справа: карта Магелланова Потока (в Южном галактическом полушарии) по данным наблюдений на длине волны 21 см на радиотелескопах Грин Бэнк и Аресибо. Рисунок воспроизведен из работы [103]. Слева: карта 3-ей (217 GHz, $w = 600'$), гармоники корреляционного сигнала Planck vs ILC, соответствующей аномальному пику на рисунке 3.8 для корреляционных окон $w = 600'$ на различных частотах [98]. Карты даны в галактических координатах.

3.2.4 О мультиполях $\ell = 3$ и 6

Как было показано выше, гармоники $\ell = 3$ и 6 являются очень интересными из-за положения пятен на них, которые отражают Магелланов Поток и аналогичный мультиполь карты ILC WMAP. Поэтому интересной задачей является их детальное исследование.

$$\ell = 6$$

Начнем со старшего мультиполя. Как было показано на рисунке 3.9, пятна этой гармоники корреляционных карт FSC vs ILC и Planck vs ILC отражают эту же гармонику карты ILC WMAP. Чтобы убедиться в этом, мы подключили фазовый анализ. Для этого коэффициенты сферических гармоник мы представили как $a_{\ell m} = |a_{\ell m}|e^{i\phi_{\ell m}}$ и сложили тригонометрические моменты:

$$S_{\sin}(\ell) = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \sin \phi_{\ell m}, \quad (3.1)$$

$$S_{\cos}(\ell) = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \cos \phi_{\ell m}, \quad (3.2)$$

чтобы вычислить средний угол мультиполя как арктангенс отношения средних значений для $\sin \phi_{\ell m}$ и $\cos \phi_{\ell m}$

$$\Theta(\ell) = \arctan \frac{S_{\sin}(\ell)}{S_{\cos}(\ell)}. \quad (3.3)$$

Их значения мы приводим в таблице 3.3.

Как видно из этой таблицы, схожие структуры на картах разных корреляций объясняются близкими значениями фаз ϕ_{6m} у мод 6-го мультиполя, особенно заметными для 2-ой, 3-ей и 4-ой мод (см. соответствующие столбцы). Это говорит, в частности, о том, что структура гармоники $\ell = 6$ может быть связана не с первичными возмущениями плотности, а со свойствами

распределения плотности радиоисточников на небе. Проявление ее в корреляционных картах работает в пользу этого заключения.

Таблица 3.3: Фазы ψ_{6m} мод мультиполя $\ell = 6$ (в радианах) для данных карты ILC и карт корреляции сигнала ILC с положением объектов FSC IRAS на длинах волн (12 μm , 25 μm и 60 μm) и с положением объектов Planck на частотах (217 GHz, 353 GHz и 545 GHz). В первом столбце приведены названия карт (M_c —карта корреляций). В последнем столбце приведены величины средних углов (в радианах) 6-го мультиполя исследуемых карт, согласно уравнению (3.3)

Карта	ψ_{61}	ψ_{62}	ψ_{63}	ψ_{64}	ψ_{65}	ψ_{66}	Θ
ILC	1.167	5.894	3.250	6.243	3.801	1.209	0.677
M_c (FSC, 60 μm)	2.674	5.578	3.364	0.656	5.166	4.433	4.662
M_c (FSC, 25 μm)	2.249	5.480	3.321	3.073	0.086	5.100	4.167
M_c (FSC, 12 μm)	2.238	5.908	3.376	2.385	6.235	4.528	3.410
M_c (Planck, 217 GHz)	2.332	1.196	3.674	0.356	4.170	1.767	2.105
M_c (Planck, 353 GHz)	1.541	0.883	4.684	0.211	4.319	1.447	0.660
M_c (Planck, 545 GHz)	6.072	5.005	3.698	0.256	4.679	1.615	5.449

Для более глубокого понимания возможных причин такого поведения этого мультиполя корреляционных карт мы провели подсчет количества источников в районе пятен, которые приведены в таблице 3.4. Номера пятен в таблице соответствуют номерам на рисунке 3.12. Особенности мультиполя $\ell = 6$ ILC являются:

- попадание пятна No. 6 точно на положение Большого Магелланова облака;
- практически симметричное положение пятен No. 6, 8, 18 и 19 относительно плоскости и центра Галактики.

Таблица 3.4: Количество объектов, расположенных в горячих и холодных пятнах 6-го мультиполя ILC, из каталогов FIRST [104], NVSS, Planck и FSC IRAS. Номера пятен, соответствующих рисунку 3.12, приведены в первом столбце. Символ рядом с номером пятна является характеристикой экстремума: h — максимум, c — минимум. Во втором столбце даны галактические координаты центров пятен. Пятна No. 10, 11, 12, 13 и 14 пропущены, так как находятся в плоскости Галактики и в анализе не участвовали. Шестое пятно совпадает с положением Большого Магелланова Облака (размер галактики БМО $10^{\circ}75 \times 9^{\circ}17$). Отметка “-” около числа источников в колонке FIRST показывает, что подсчет источников неполный из-за неполноты обзора. Знак “-” в столбце означает отсутствие данных в обзоре (зона вне наблюдений).

No.	l , deg	b , deg	FIRST	NVSS	Planck	IRAS
1h	8.911	-65.614	-	4061	38	225
2c	121.288	-60.294	2854-	4599	26	185
3h	178.218	-49.654	3464-	4401	41	354
4c	224.655	-42.561	-	3897	29	354
5c	320.879	-40.788	-	-	24	467
6h	276.238	-33.694	-	-	421	918
7c	42.772	-31.921	930-	4094	71	334
8h	98.020	-31.921	-	4148	71	307
9c	199.604	-19.507	-	4335	113	391
15c	165.743	+10.640	-	4359	67	526
16c	19.604	+19.507	7036	4292	62	336
17h	222.772	+31.921	-	3905	26	341
18h	278.020	+31.921	1695-	4110	104	589
19c	96.238	+33.694	-	4160	146	373
20c	140.792	+40.788	7046	4131	35	381
21h	44.554	+42.561	6784	4202	25	371
22c	358.218	+49.654	6516	4075	75	206
23h	301.188	+60.294	7124	3981	22	328

Эффект симметрии усиливается также превышением более чем в полтора раза числа источников в пятнах No. 6 (что и ожидается для БМО), 18

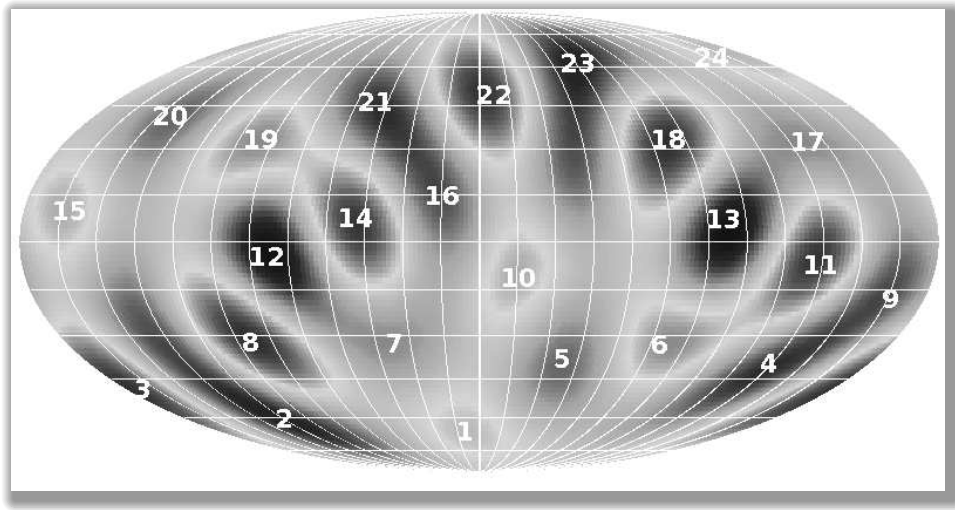


Рисунок 3.12: Номера исследуемых зон (горячих и холодных пятен) для 6-го мультиполя карты WMAP ILC. На карту наложена галактическая координатная сетка [105].

и 19 из каталога Planck, и в пятнах 6 и 18 из каталога FSC IRAS. Кроме того, эффект структуры мультиполя $\ell = 6$ может быть усилен из-за того, что южный эклиптический полюс (галактические координаты: $l = 97^{\circ}742$, $b = -60^{\circ}181$) находится недалеко от БМО. Данные каталога NVSS не показывают больших отклонений от среднего, что соответствует исследованиям статистики корреляций ILC и NVSS [106], а обзор FIRST покрывает лишь небольшую часть сферы.

$$\ell = 3$$

Октуполь (гармоника $\ell = 3$) карты корреляций сигнала ILC с положениями источников Planck (см. рисунок 3.11) является доминирующей по амплитуде гармоникой для данных Planck на частотах 30 GHz, 44 GHz, 100 GHz, 143 GHz, 217 GHz (рисунок 3.8) с превышением уровня разброса 3σ , получаемого при моделировании гауссова сигнала СМВ. Гармоника начинается в северном левом ($b > 0^{\circ}$, $0^{\circ} < l < 180^{\circ}$) галактическом квадранте, спускается в южную полусферу и поднимается в северное полушарие ($b > 0^{\circ}$, $180^{\circ} < l < 360^{\circ}$). Октуполь перестает быть видимым

относительно модельных угловых спектров мощности на частотах 545 GHz и 857 GHz. Кроме того, на высоких частотах значительно меняются и фазовые характеристики (рисунок 3.13 и таблица 3.5). Также отметим, что на более высоких частотах, как, например, в данных IRAS, такого пика также нет.

Таблица 3.5: Фазы мод октуполя $\ell = 3$ (в радианах) карт корреляции сигнала ИЛС с положением источников каталога Planck. В первом столбце приведены частоты миссии Planck. В последнем столбце приведены величины (в радианах) средних углов (см. уравнение 3.3) октуполя исследуемых карт.

ν , GHz	ψ_{31}	ψ_{32}	ψ_{33}	Θ
30	4.461	3.611	2.876	3.644
44	3.892	3.631	3.020	3.518
70	4.780	3.222	2.763	3.506
100	3.684	3.628	2.676	3.342
143	3.537	3.560	2.730	3.283
217	3.736	3.541	2.803	3.367
353	2.955	3.784	2.843	3.185
545	1.825	4.718	2.754	2.855
857	2.191	5.179	1.884	2.037

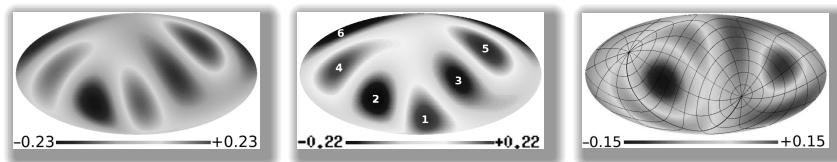


Рисунок 3.13: Мультиполь $\ell = 3$ карт корреляций ИЛС с картой положений источников Planck на частотах 30 GHz (слева), 217 GHz (в центре) и 847 GHz (справа) в галактической системе координат. На правую карту наложена сетка экваториальной системы координат. Ее полюса попадают на особые (седловидные) точки [105].

Результаты работы опубликованы в [98, 105].

3.3 Исследование неоднородности реликтового фона по угловому спектру мощности

Как уже говорилось ранее, реликтовый фон согласно Λ CDM-космологии должен быть гауссовым и статистически изотропным. Но по всей видимости это выполняется не всегда. Например, в работе [46] было показано, что карта ILC WMAP содержит больше сигнала от нечетных ($\ell+m$ нечетно) гармоник, т.е. она является в некоторой степени антисимметричной. А в работе [97] мы выяснили, что некоторые зоны, симметричные относительно галактической и экваториальной плоскости, обладают большими коэффициентами антикорреляции. Поэтому возникает новая важная задача — задача локализации негауссовости.

В этом разделе мы используем метод, описанный в главе 2.2 для локализации статистической анизотропии реликтового излучения на карте ILC WMAP. Поскольку детали метода уже были описаны ранее, дадим только обоснование его применения.

На больших угловых масштабах ($\ell \leq 50$) распределение анизотропии реликтового фона должно соответствовать спектру Харрисона–Зельдовича. Под данным WMAP спектральный индекс n_S для этой области мультиполей приблизительно ≈ 0.96 . Поэтому спектр в этой области должен хорошо аппроксимироваться прямой. Следовательно, значения спектра мощности для всех мультиполей в этом диапазоне должны быть приблизительно одинаковыми, а значит их дисперсия должна быть достаточно мала. Кроме того, если рассматривать различные области θ на нем, то и дисперсия не должна сильно меняться. Как показывает моделирование, наличие постороннего сигнала или маскирование областей изменяет спектр мощности, придавая ему пилообразную форму, что увеличивает его дисперсию. Значит, дисперсию спектра мощности можно использовать в качестве эстиматора, кроме того, если вычислять сам спектр по некоторой области с координатами (θ, ϕ) , то появляется возможность картографирования результата.

3.3.1 Особенности метода

В работе мы использовали эстиматоры, описанные в главе 2.2. Спектр мощности рассчитывался по полушариям. Чтобы избежать трудностей с пикселизацией при вычислении спектра мощности только по полушарию (краевых эффектов), мы поворачивали карты в гармонической области [107] так, чтобы полусфера, ограничивающая данные, используемые при вычислениях точно совпадала с севером или югом. Поскольку угловой спектр мощности надо считать по всей сфере (либо с помощью сложных корреляционных функций и псевдо-спектра мощности [2]), мы зеркально отображали полусферу, ограничивающую данные, используемые при вычислениях во вторую полусферу и в дальнейшем вычисляли угловой спектр мощности уже по такой новой полной карте с информацией только по одному полушарию. Мы делали четные (со знаком '+') и нечетные (со знаком '-') отображения, примеры таких отображений приведены на рисунке 3.14. На рисунке 3.15 примеры спектров мощности. Для анализа оказались пригодными только карты с нечетным отображением по двум причинам:

- сигнал ILC WMAP является в основном нечетным, т.к. в нем доминируют нечетные гармоники $(\ell + m)$ [45, 46, 97];
- контрастность нечетных карты больше по сравнению с четным, а поведение дисперсии схожее.

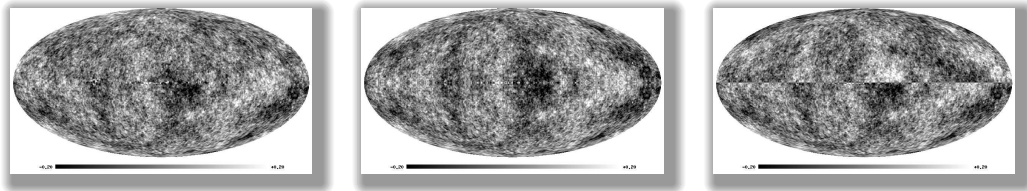


Рисунок 3.14: Слева направо: карта сигнала микроволнового фона WMAP ILC, карта с четным отображением ILC южной полусферы и карта с нечетным отображением [108].

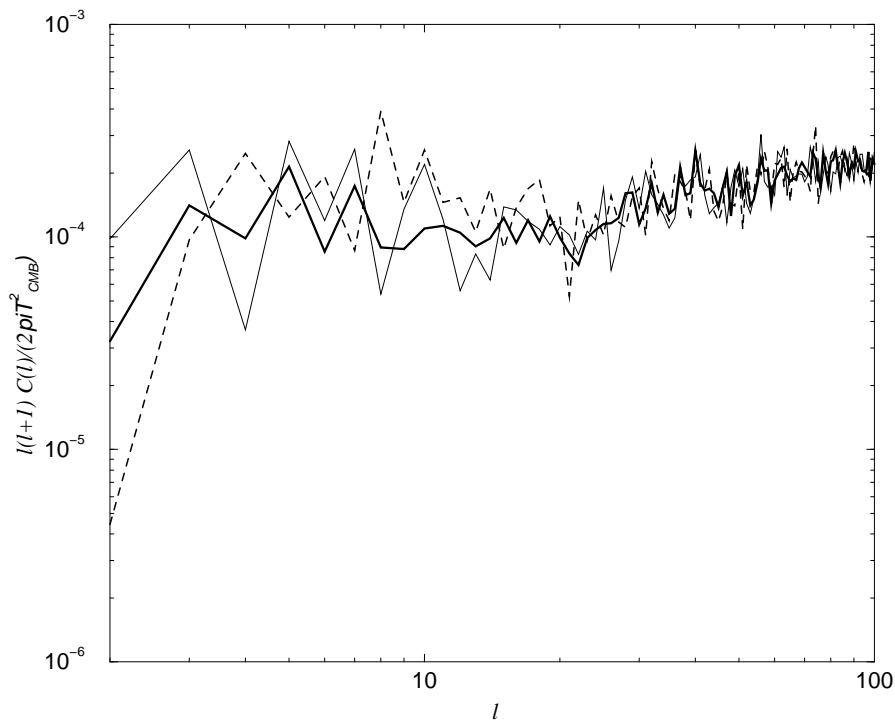


Рисунок 3.15: Примеры трех модельных спектров мощности в Λ CDM-космологии [108].

3.3.2 Результат

Карты, построенные по дисперсии спектра мощности, будем называть Σ_1 -карты, по дисперсии разности спектров мощности Σ_2 . Ниже на рисунках 3.16, 3.20, 3.17, 3.21, 3.19, 3.22 приведены эти карты для карты ILC и каналов **W** и **V** ILC и случайных гауссовых Λ CDM-полей. Для этих карт мы использовали разрешение $2 \leq \ell \leq 100$ ($n_x = 201$, $n_p = 402$).

Σ_1 -карты

На рисунке 3.16 приведена Σ_1 -карта для сигнала ILC. Выделенные неоднородности лежат в эклиптических полюсах и соответствуют разли-

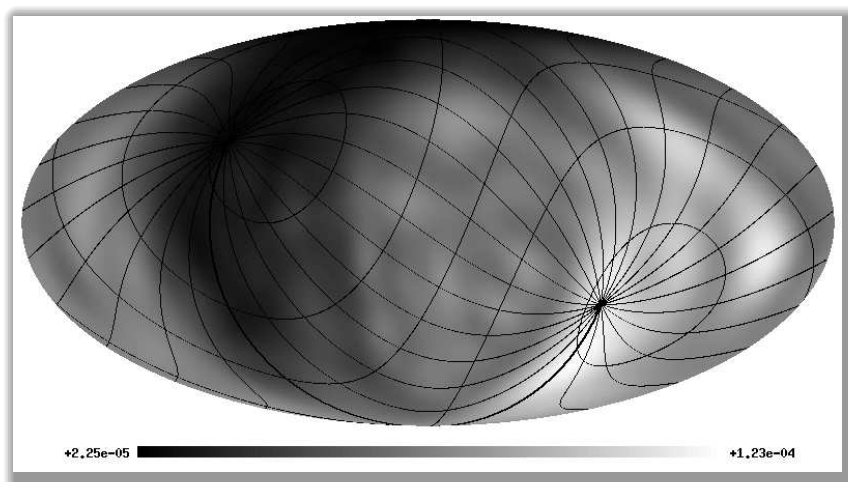


Рисунок 3.16: Σ_1 -карта, рассчитанная для данных ILC WMAP с эклиптической координатной сеткой [108].

цию анизотропии сигнала в северном и южном эклиптических полушариях. В этом сигнале значительна дипольная компонента, показанная на рисунке 3.23. Как видно, на модельной карте не наблюдается такого эффекта.

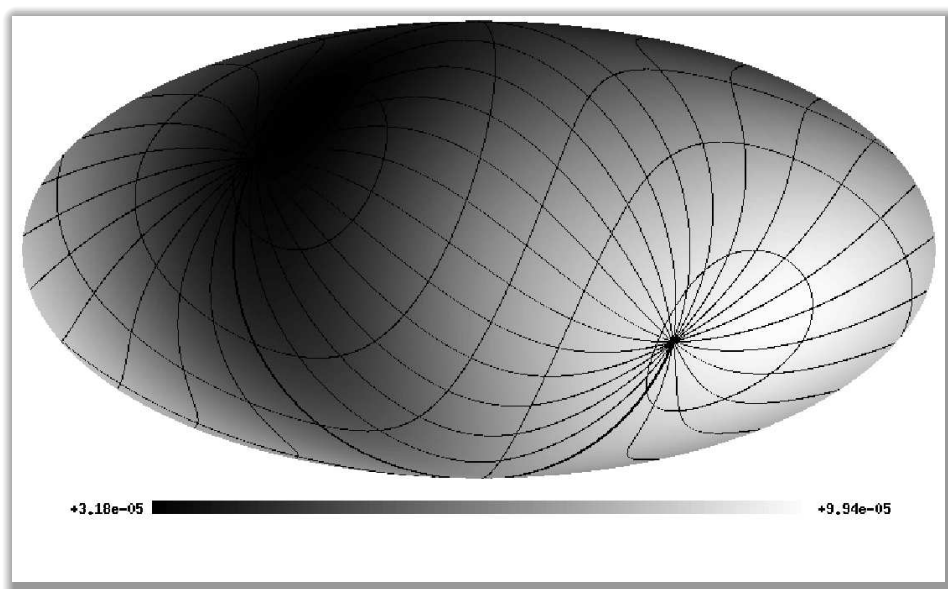


Рисунок 3.23: Диполь Σ_1 -карты ILC WMAP с эклиптической сеткой координат [108].

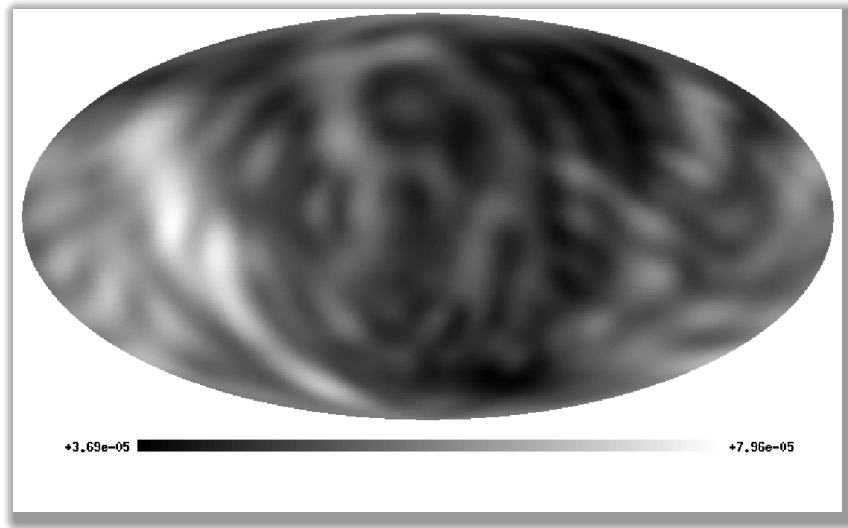


Рисунок 3.17: Σ_1 -карта для случайной гауссовой модели [108].

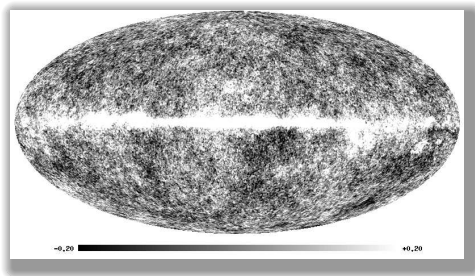


Рисунок 3.18: Карта канала V WMAP [108].

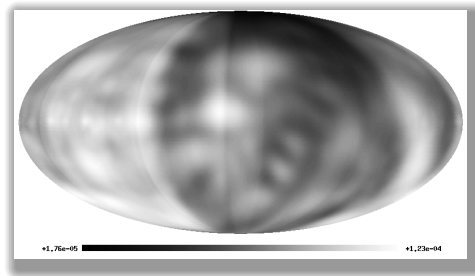


Рисунок 3.19: Σ_1 -карта, рассчитанная для канала V WMAP [108].

В качестве еще одной характеристики однородности Σ -карты мы использовали положения локальных экстремумов. На рисунке 3.24 приведена такая диаграмма для Σ_1 -карты ILC. Рядом на рисунке 3.25 аналогичная диаграмма, но для карт, смоделированных в Λ CDM-космологии. На первой диаграмме все экстремумы сконцентрированы в области $\pm 20^\circ$ около центрального сечения, на второй же все экстремумы распределены равномерно.

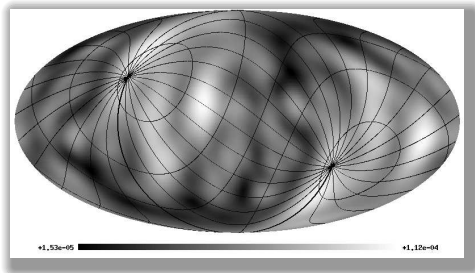


Рисунок 3.20: Σ_2 -карта
рассчитанная для данных ILC
WMAP с эллиптической сеткой
координат [108].

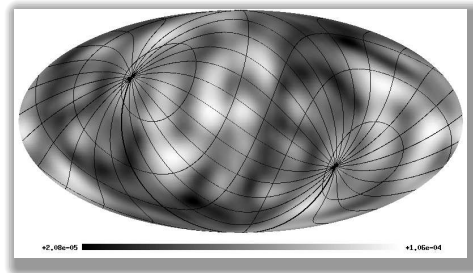


Рисунок 3.21: Σ_2 -карта
рассчитанная для канала W WMAP
с эллиптической сеткой
координат [108].

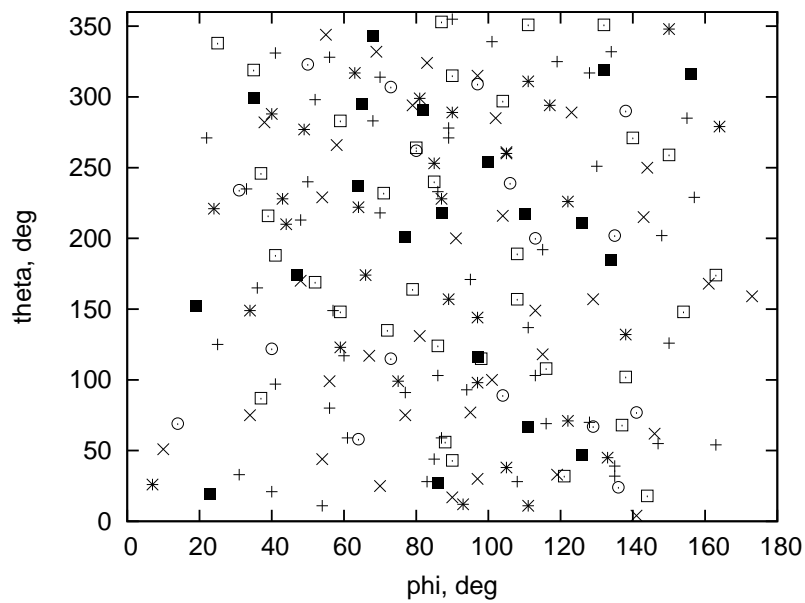


Рисунок 3.25: Диаграмма локальных экстремумов Σ_1 -карты модельных
данных по Λ CDM-космологии [108].

Положение экстремумов отображает топологические особенности карты, и применение такой диаграммы к Σ -карте показывает топологию неоднородностей, вызванных особенностью спектра мощности.



Рисунок 3.22: Σ_2 -карта для случайного гауссового поля в Λ CDM-космологии [108].

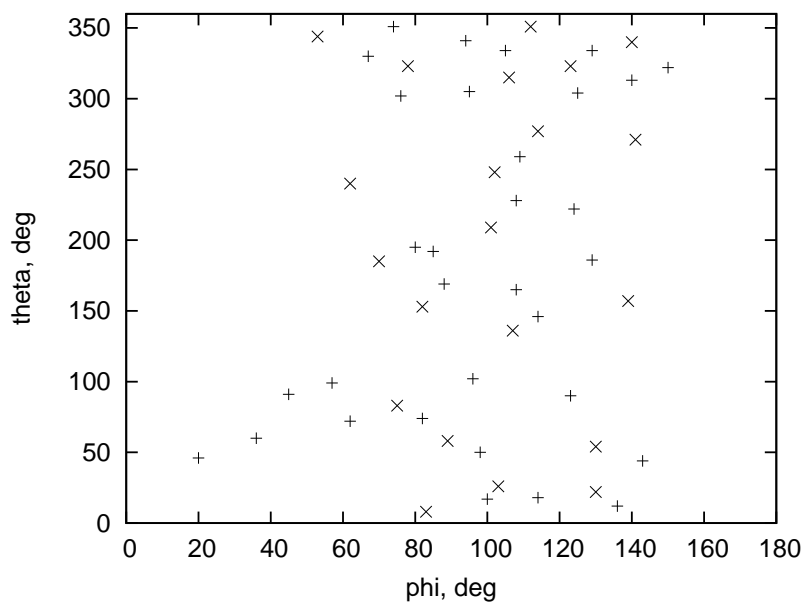


Рисунок 3.24: Диаграмма локальных экстремумов Σ_1 -карты ILC. Минимумы помечены плюсами, максимумы крестами [108].

Σ_2 -карты

На рисунке 3.21 приводятся результаты расчета Σ_2 -карт для сигналов ILC и канала W WMAP. В распределение Σ_2 -сигнала как для ILC, так и для канала W, отмечаются полюса эклиптики, где имеются максимумы сигнала, а также полоса минимальной дисперсии в области эклиптики. Это подобие сигнала демонстрируется практически одинаковыми квадруполями Σ_2 -карт (рисунки 3.26 и 3.27).

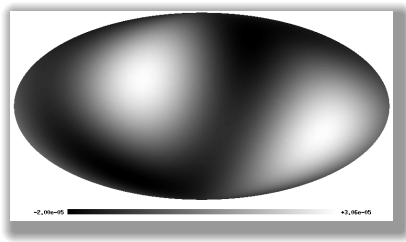


Рисунок 3.26: Квадруполь Σ_2 -карты ILC WMAP [108].

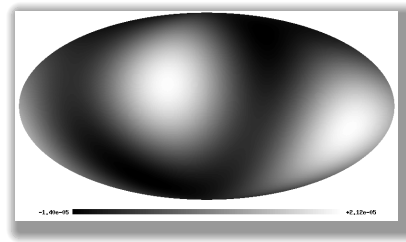


Рисунок 3.27: Квадруполь Σ_2 -карты канала W WMAP [108].

Для сравнения на рисунке 3.22 приведена Σ_2 -карта, рассчитанная для модели гауссовых флуктуаций СМВ в космологической модели Λ CDM.

Σ_2 -картографирование обнаружило схожее поведение дисперсии углового спектра мощности сигналов ILC и канала W.

Вероятность попадания пятен квадруполя в зону $\sim 5^\circ$ рядом с одним из полюсов была оценена в [74] в 0.004. Это говорит о том, что карта ILC WMAP “знает” об эклиптике. А при том, что имеется еще и совпадение квадруполей Σ_2 -карт ILC WMAP и канала W WMAP, можно говорить о высокочастотном сигнале в неоднородности. Обособленность плоскости эклиптики была уже подчеркнута в [109].

Результаты опубликованы в [108].

3.4 Корреляционные свойства CMB, 2MRS и SDSS

В главе 2.1 давалось описание метода мозаичной корреляции. Для исследования корреляционных свойств CMB, 2MRS и SDSS нам потребовалось расширить этот метод, создав тем самым пятимерную корреляционную функцию.

Как известно, помимо первичных флуктуаций реликтового излучения, которая имеет космологическую природу, в наблюдаемом радиэфоне должны быть и вторичные возмущения. Есть четыре основных источника, которые вносят их, это

- эффект Сакса–Вольфа [110],
- эффект Зельдовича–Сюняева [111, 112],
- гравитационное линзирование [113],
- вторичная ионизация.

Кроме того, на масштабах скоплений наблюдаются радиогало скоплений и гигантские радиогалактики, которые также искажают микроволновый фон [114–117] и неразрешенные (или слабо разрешенные) галактические и внегалактические источники.

Поскольку каждый из этих эффектов проявляется на определенном угловом масштабе (плоское сферическое представление) и в определенную эпоху (пространственное представление по красному смещению), представляет большой интерес исследование влияния этих эффектов на угловой спектр возмущений реликтового фона. Связь между этими эффектами отражена в передаточной функции $\Phi(z, \ell)$, которой может служить корреляционная функция фонового излучения и положений внегалактических источников — $K(\mathbf{n}, \omega, z, \ell)$, где \mathbf{n} — направление на небе, ω — размер окна корреляции, z — красное смещение из диапазона $[z, z + \Delta z]$, ℓ — мультиполь, для которого построена карта CMB. Другими словами, корреляционный метод позволяет

исследовать подынтегральную функцию, используемую при описании наблюдаемого углового спектра мощности СМВ

$$C_\ell = \int q_k^2 W_\ell^2(k\eta_0) \frac{dk}{k}, \quad (3.4)$$

где $W_\ell(k\eta_0)$ — передаточная функция, связывающая трехмерный спектр возмущений и двухмерный спектр анизотропии СМВ, в который входит $\Phi(z, \ell)$, q_k — Фурье-амплитуда q -поля первичных возмущений на пространственной частоте k , η_0 — текущий момент времени.

3.4.1 Используемые данные

Для реликтового излучения мы взяли карту ILC, подготовленную командой WMAP. Как и раньше мы использовали параметры разрешения $2 \leq \ell \leq 100$ ($n_x = 201$, $n_p = 402$).

Для вычисления корреляционных карт мы пользовались каталогами 2MRS [100] и SDSS [118]. В таблице 3.6 приведено количество объектов для всех бинов красного смещения z каталога SDSS.

Таблица 3.6: Число объектов (N) SDSS в разных диапазонах красных смещений z , отобранных для построения карт.

Диапазон z	N	Диапазон z	N	Диапазон z	N
$0.0 \leq z < 0.1$	913 407	$2.0 \leq z < 2.1$	5120	$4.0 \leq z < 4.1$	377
$0.1 \leq z < 0.2$	381 679	$2.1 \leq z < 2.2$	7781	$4.1 \leq z < 4.2$	267
$0.2 \leq z < 0.3$	113 841	$2.2 \leq z < 2.3$	11 108	$4.2 \leq z < 4.3$	209
$0.3 \leq z < 0.4$	117 943	$2.3 \leq z < 2.4$	10 429	$4.3 \leq z < 4.4$	156
$0.4 \leq z < 0.5$	136 594	$2.4 \leq z < 2.5$	8452	$4.4 \leq z < 4.5$	113
$0.5 \leq z < 0.6$	176 965	$2.5 \leq z < 2.6$	6650	$4.5 \leq z < 4.6$	102
$0.6 \leq z < 0.7$	83 894	$2.6 \leq z < 2.7$	5254	$4.6 \leq z < 4.7$	93
$0.7 \leq z < 0.8$	25 385	$2.7 \leq z < 2.8$	3787	$4.7 \leq z < 4.8$	83
$0.8 \leq z < 0.9$	9692	$2.8 \leq z < 2.9$	3510	$4.8 \leq z < 4.9$	70
$0.9 \leq z < 1.0$	6481	$2.9 \leq z < 3.0$	3458	$4.9 \leq z < 5.0$	53
$1.0 \leq z < 1.1$	6062	$3.0 \leq z < 3.1$	3237	$5.0 \leq z < 5.1$	40
$1.1 \leq z < 1.2$	5796	$3.1 \leq z < 3.2$	2893	$5.1 \leq z < 5.2$	33

Продолжение таблицы 3.6

Диапазон z	N	Диапазон z	N	Диапазон z	N
$1.2 \leq z < 1.3$	6239	$3.2 \leq z < 3.3$	2240	$5.2 \leq z < 5.3$	35
$1.3 \leq z < 1.4$	5939	$3.3 \leq z < 3.4$	1526	$5.3 \leq z < 5.4$	17
$1.4 \leq z < 1.5$	6133	$3.4 \leq z < 3.5$	766	$5.4 \leq z < 5.5$	16
$1.5 \leq z < 1.6$	7416	$3.5 \leq z < 3.6$	845	$5.5 \leq z < 5.6$	22
$1.6 \leq z < 1.7$	7071	$3.6 \leq z < 3.7$	965	$5.6 \leq z < 5.7$	23
$1.7 \leq z < 1.8$	6345	$3.7 \leq z < 3.8$	908	$5.7 \leq z < 5.8$	50
$1.8 \leq z < 1.9$	5846	$3.8 \leq z < 3.9$	687	$5.8 \leq z < 5.9$	26
$1.9 \leq z < 2.0$	5360	$3.9 \leq z < 4.0$	487	$5.9 \leq z < 6.0$	102

Каталог 2MRS

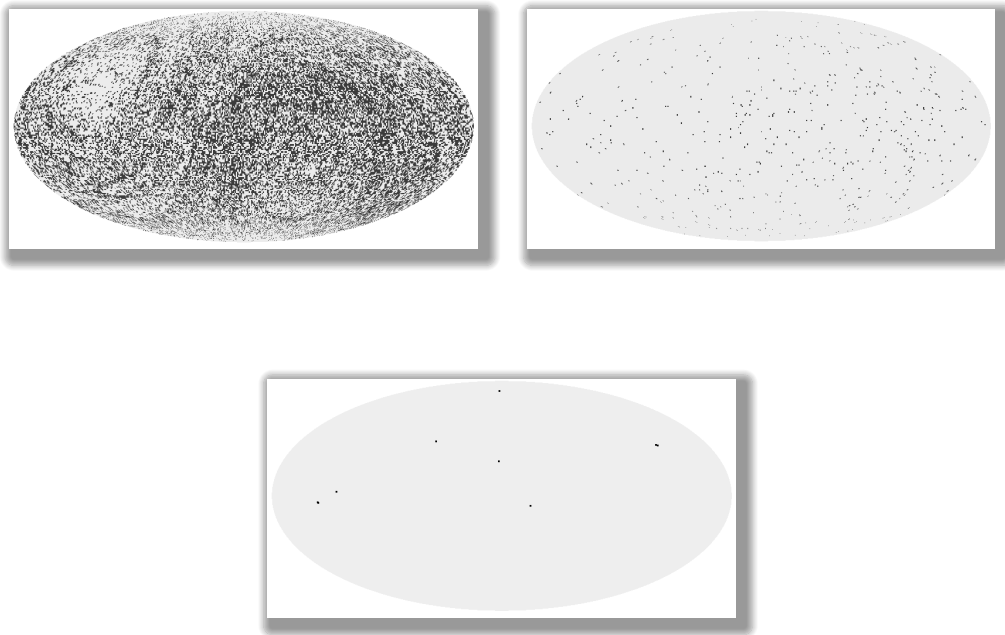


Рисунок 3.28: Положение объектов каталога 2MRS на сфере в галактических координатах. На верхнем левом рисунке объекты из диапазонов $0 < z < 0.1$, на верхнем правом — из диапазона $0.1 \leq z < 0.2$, на нижнем — $0.2 \leq z < 0.3$ [119].

Каталог всего неба 2MASS [120] (о котором уже говорилось выше в разделе 3.2) получен на 1.3m телескопах обсерваторий Mt. Hopkins (Arizona) и Cerro Tololo (Chile). Он включает $\sim 4.7 \times 10^8$ точечных объектов PSC и каталог протяженных источников XSC (или 2MASX), содержащий $\sim 1.6 \times 10^6$ объектов, преимущественно галактик ($\sim 90\%$) [121]. Примерно 2–5% объектов XSC являются областями путаницы из-за двойных звезд или артефактов (например, содержащих часть излучения ярких звезд). Излучение на длинах волн близкого инфракрасного диапазона чувствительно к старому звездному населению, которое доминирует в видимых массах эллиптических галактик. Таким образом, каталог 2MASS является хорошим инструментом для исследования распределения материи в близкой Вселенной. Авторы [122] подготовили выборку, содержащую 44 599 галактик обзора 2MASS, в диапазоне величин с $K_s \leq 11.75$ и галактических широт $|b| \geq 5^\circ$ (и $\geq 8^\circ$ по направлению к галактическому балджу). Проект обзора красных смещений галактик 2MRS продолжался 10 лет и позволил построить трехмерное распределение галактик ближней Вселенной. Положение объектов 2MRS из разных диапазонов красных смещений (34 919 шт. из $0 < z < 0.1$, 540 шт. из $0.1 \leq z < 0.2$ и 7 шт. из $0.2 \leq z < 0.3$) на небесной сфере показано на рисунке 3.28.

Каталог SDSS

Слоановский цифровой обзор неба SDSS [118] получен на 2.5m оптическом телескопе обсерватории в Apache Point Observatory, New Mexico и с использованием двух уникальных инструментов: 120-мегапиксельной камерой с полем зрения 1.5° и парой спектрографов с оптической фиберной системой для измерения спектров. В результате обзора подготовлены снимки более чем четверти неба и пространственные карты, содержащие $\sim 1.4 \times 10^6$ галактик и $\sim 2.3 \times 10^5$ квазаров.

Для вычисления корреляционных карт мы выбрали объекты из каталога SDSS с помощью web-интерфейса on-line базы данных через интерфейс CasJobs, как с измеренными спектроскопическими (таблица SpecObj) красными смещениями z , так и фотометрическими оценками z (таблица

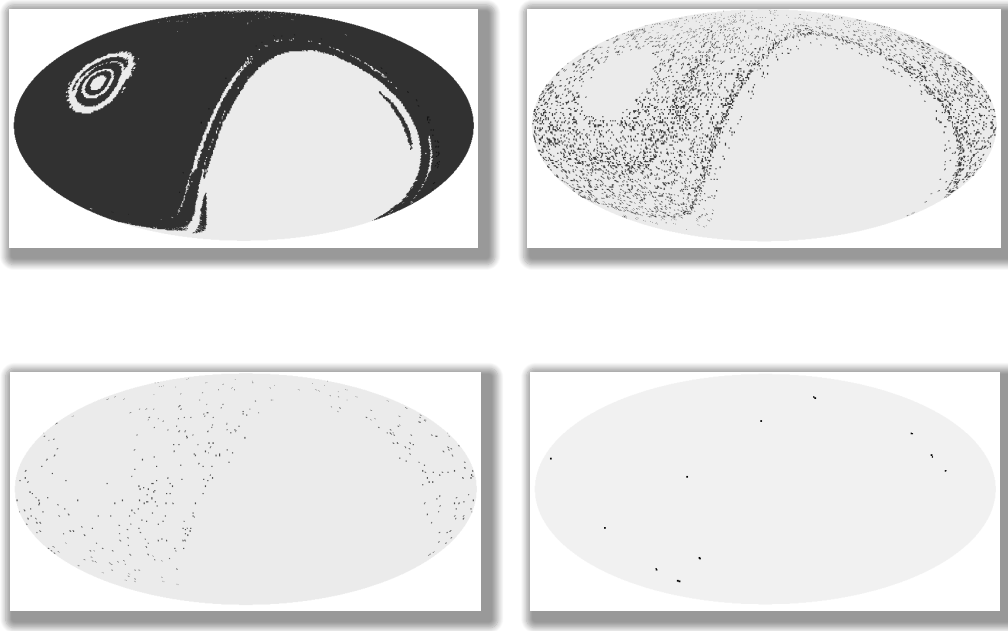


Рисунок 3.29: Примеры карт с положениям объектов каталога SDSS на сфере в галактических координатах. Сверху вниз слева направо: объекты из диапазонов $0 \leq z < 0.1$, $2.0 \leq z < 2.1$, $4.0 \leq z < 4.1$, $6.0 \leq z < 6.1$ [119].

PhotoObj). Положение объектов SDSS из разных диапазонов красных смещений на небесной сфере показано на рисунке 3.29 (см. также таблицу 3.6¹).

3.4.2 Корреляционные функции

Как уже было сказано выше, мы использовали метод мозаичной корреляции (см. главу 2.1), как базовый метод, который адаптировали к нашей задаче. Для этого мы добавили два параметра — диапазон красных смещений z ($z \in [z, z + \Delta z]$) и выбор мультиполя из исходной карты (ILC WMAP). Карты точечных источников перед вычислением корреляции сглаживались гауссианой с одной из полуширин $\theta = 3^\circ, 5^\circ$ или 10° в гармоническом про-

¹При построении выборки из первого SpecObj исключались объекты QA, повторы и объекты таблицы Sky, кроме того, использовались только объекты с надежно измеренным красным смещением.

странстве для приведения их к одному разрешению. Области, где какая-либо из карт не содержала данных, исключалась из анализа.

3.4.3 Результаты

В результате были получены корреляционные карты на различных угловых масштабах. При анализе мы пользовались окном сглаживания $\theta = 10^\circ$. На рисунках 3.30 и 3.31 приведены карты мозаичных корреляций для 2MRS и SDSS с окнами корреляции $w = 300'$ (максимальный мультиполь $\ell_{max} = 18$), $600'$ ($\ell_{max} = 9$) и $900'$ ($\ell_{max} = 5$). Угловые масштабы, которые мы использовали, приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7: Номера мультиполей (левая колонка) и соответствующие им угловые масштабы (правая колонка).

Номер гармоники ℓ	Угловой масштаб
10	$\sim 8^\circ$
30	$\sim 3^\circ$
50	$\sim 2^\circ$
100	$\sim 1^\circ$

Мощные гармоники

На рисунке 3.32 приведены кривые эволюции (некоторые сечения $K(\mathbf{n}, \omega, z, \ell)$ в параметрическом пространстве (z, ℓ)) корреляции для различных параметров. Здесь $z \in [z, z + \Delta z]$, $\Delta z = 0.1$, ℓ — номер мультиполя исходной карты СМВ.

Среди наиболее сильных гармоник на рисунке 3.32, превосходящих уровень разброса 3σ для гауссовых моделей Λ CDM, выделяются гармоники на $z \simeq 0.8$ и $z \simeq 1.9$ для угловых масштабов $2-3^\circ$. Кроме того, для $\ell = 100$ в корреляционных картах на разных масштабах возникает в “эволюционном” спектре пик в районе $z \simeq 5.4$. Это соответствует масштабам $\sim 1^\circ$. Угловые масштабы, соответствующие найденным гармоникам, составляют

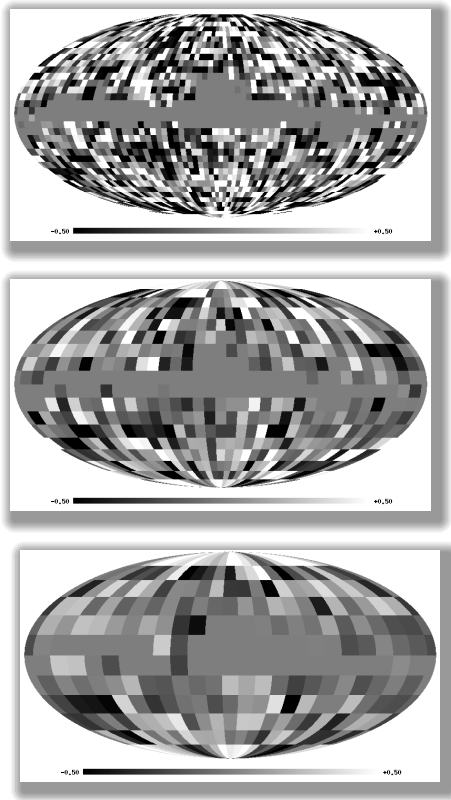


Рисунок 3.30: Примеры карт мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога 2MRS (объекты из диапазона $0 \leq z < 0.1$) для различных окон корреляции (сверху вниз: $300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах. Область Галактики экранирована маской [119].

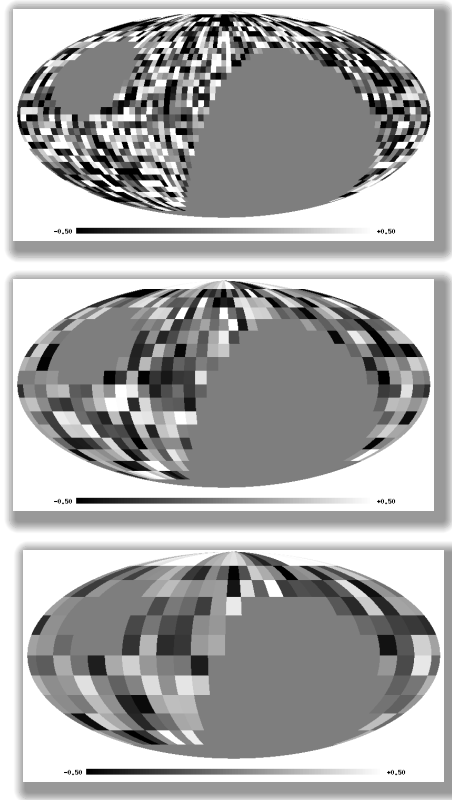


Рисунок 3.31: Примеры карт мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога SDSS (объекты из диапазона $1 \leq z < 1.1$) для различных окон (сверху вниз: $300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах. Зоны отсутствия наблюдений в обзоре SDSS экранированы маской [119].

приблизительно $\sim 2^\circ \div 3^\circ$. На $z \sim 0.8$ и $z \sim 1.9$ в космологической модели Λ CDM ($H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_\Lambda = 0.72$, $\Omega_m = 0.28$) линейные размеры являются близкими и составляют $D \sim 60 - 90 \text{ Mpc}^2$ для данных

²Получено с помощью космологического калькулятора:
<http://www.bo.astro.it/~cappi/cosmotools>

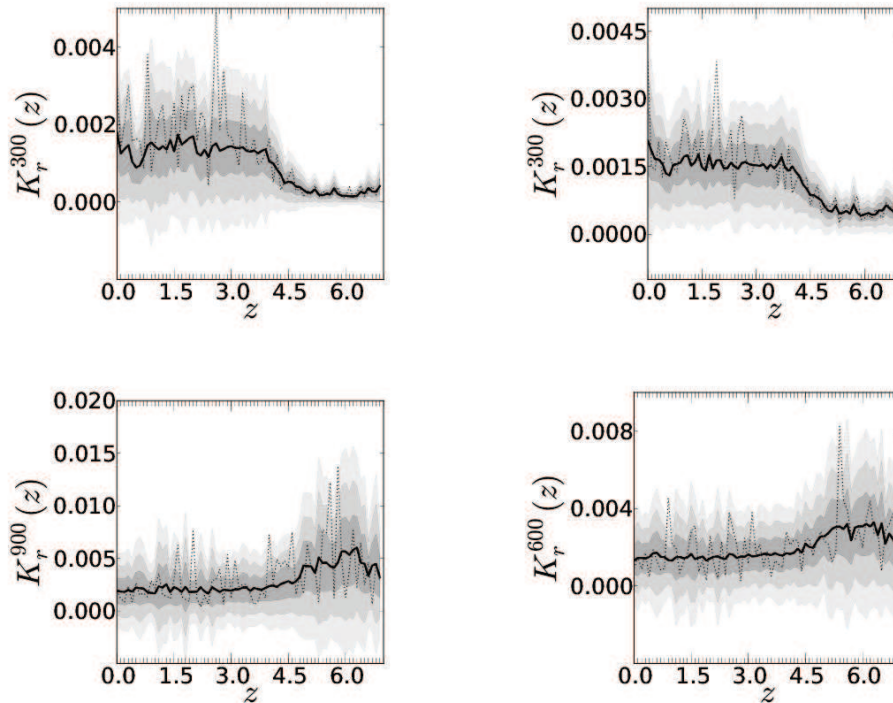


Рисунок 3.32: Примеры угловых спектров мощности для заданных гармоник карты корреляций данных SDSS (плотности потока в фильтре r , объекты из диапазона $1 \leq z < 1.1$) и ILC WMAP. Слева направо сверху вниз: (1) рисунок “эволюционной” корреляции $K_{\tilde{\ell}}(z, \ell)$, где $\tilde{\ell} = 4$ гармоника из корреляционной карты, $\ell = 50$ — гармоника исходной карты CMB, размер окно корреляции выбран $\omega = 300'$, амплитуда сигнала выше уровня 3σ ; (2) корреляция $K_{\tilde{\ell}}(z, \ell)$, $\tilde{\ell} = 11$, $\ell = 30$, $\omega = 600'$, уровень $> 2\sigma$; (3) $\tilde{\ell} = 3$, $\ell = 100$, $\omega = 900'$, уровень $> 3\sigma$; (4) $\tilde{\ell} = 4$, $\ell = 100$, $\omega = 600'$, уровень $> 3\sigma$. Наблюдаемые пики, выходящие за 2σ -уровень разброса, соответствуют корреляционным масштабам с выделенным пространственным размером на данном красном смещении [119].

угловых масштабов. Этот размер мы интерпретируем как размер ячейки неоднородности крупномасштабной структуры на этих красных смещениях z . На больших линейных масштабах наблюдается переход к гауссовому распределению материи и, соответственно, к гладкому поведению спектра мощности (без выделенных пиков) в карте мозаичной корреляции. Наша величина максимальной ячейки неоднородности согласуется с исследования-

ми [123–125], в которых для анализа применялся метод обобщенных размерностей (фрактальный подход) или построение кросс–корреляционной функции скоплений. Полученный результат находится в согласии с данными моделирования в рамках Λ CDM–космологической модели [126].

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

Использование каталога 2MRS в проведенном исследовании оказалось не столь эффективным. Как видно из рисунка 3.28, каталог 2MASS имеет малое число объектов при $z > 0.2$. Тем не менее, в распределении пикселей имеются отклонения от ожидаемых для гауссовых возмущений плотности (рисунок 3.33), что, скорее всего, обусловлено локальным (на близких пространственных масштабах) нарушением гауссовости. Ввиду отсутствия сильных пиков в спектре мощности мозаичных карт корреляций мы не стали исследовать зависимость спектра мощности от красного смещения для корреляционных карт 2MASS. Однако представляет интерес исследование карт для меньшего диапазона z с меньшим шагом Δz и лучшим разрешением в картах CMB, измеренным в космической миссии Planck, где будет доминировать эффект Зельдовича–Сюняева.

Для $z \sim 5.2$ масштабы $\theta \sim 1^\circ$ соответствуют размеру $D \sim 20$ Мpc. Отметим, что момент $z \sim 5$ является концом эпохи реионизации, в результате действия которой флуктуации CMB “замазывались”. Следует сказать, что результат на $z \sim 5.2$ требует дополнительной проверки из-за возможного влияния особенностей анализа данных на предельном угловом разрешении карты WMAP, а также малости числа галактик на данном z . В дальнейшем мы проверим полученные результаты с использованием карт эксперимента Planck, имеющих лучшее разрешение.

Результаты опубликованы в [119].

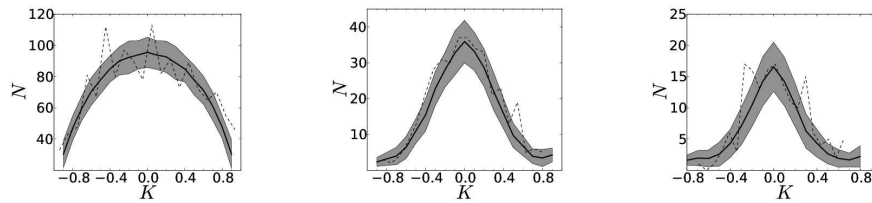


Рисунок 3.33: Примеры гистограмм распределения значения пикселей K карты корреляций данных 2MRS (плотности потока в фильтре J_s , объекты из диапазона $0 \leq z < 0.1$) и ILC WMAP (данные показаны пунктирной линией) для различных корреляционных окон (слева направо — $300'$, $600'$, $900'$). Серым фоном отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных 2MRS с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели [119].

Глава 4

Web–сервер для анализа данных на сфере

В этой главе описывается разработанный вычислительный Web–сервер, который находится по адресу <http://cmb.sao.ru> [127]. Он позволяет:

- синтезировать карты протяженного излучения на полном небе из сферических гармоник в сетке пикселизации GLESP,
- сглаживать карты диаграммой направленности с различным угловым разрешением в пространстве мультиполей,
- выделять области неба с заданными координатами в галактической системе координат.

Дается описание процесса получения доступа к серверу, а также технологии построения карты участков неба.

4.1 Введение

На сегодняшний день самая большая база данных разночастотных наблюдений — виртуальная обсерватория SkyView¹. Она содержит в себе данные от радио до гамма-диапазона, среди которых

¹<http://skyview.gsfc.nasa.gov>

- оцифрованный Паломарский обзор неба Digitized Sky Survey (DSS),
- Слоановский обзор SDSS [118],
- данные спутника WMAP [2–4, 128],
- данные спутника Planck [11, 28, 29],
- данные спутника ROSAT [129],
- и другие.

SkyView позволяет получить доступ ко всем данным на максимальном разрешении, доступном в обзорах. Несмотря на большие возможности этого web-сервиса, он все-таки остается базой данных и не позволяет посылать более сложные запросы, которые давали бы возможность работать с данными в гармонической области и вырезать отдельные площадки. Эта задача должна выполняться отдельно с помощью таких пакетов, как HEALPix² [130] и GLESP³ [69].

Поэтому становится актуальной задача создания web-сервера, который позволил бы работать с гармоническими данными на сфере, а именно

- синтезировать карты протяженного излучения из сферических гармоник,
- сглаживать их диаграммой направленности с различным угловым разрешением в пространстве мультиполей,
- и вырезать отдельные области неба.

Эта задача актуальна при

- исследовании распределения сигнала на сфере,
- анализе корреляционных карт,

²<http://healpix.jpl.nasa.gov>

³<http://www.glesp.nbi.dk>

- изучения негауссовости низких гармоник СМВ, которые приводят к статистической анизотропии [12, 75].

Далее будет описана архитектура предлагаемой системы, способы получения доступа к репозиторию и ее базовые возможности. Система состоит из двух независимых web-приложений, которые предоставляют

1. доступ к полным картам (реализовано на языке perl) и
2. доступ к работе с выбранными площадками на небе на заданной частоте с заданными параметрами разрешения (n_x, n_p) (см. главу 1.2); реализовано на языке python⁴ с применением свободного фреймворка Django⁵.

Определение 2. *Фреймворк (англ. framework — каркас, структура) — структура программной системы; программное обеспечение, облегчающее разработку и объединение разных компонентов большого программного проекта. Употребляется также слово “каркас”, а некоторые авторы используют его в качестве основного, в том числе не базируясь вообще на англоязычном аналоге. Можно также говорить о каркасном подходе как о подходе к построению программ, где любая конфигурация программы строится из двух частей: первая, постоянная часть — каркас, не меняющийся от конфигурации к конфигурации, и несущий в себе гнезда, в которых размещается вторая, переменная часть — сменные модули (или точки расширения).*⁶

4.2 Архитектура базы данных

При разработке новой базы мы воспользовались теми же концепциями, что и при проектировании серверов CATS⁷ [131–134] и SEDs⁸ [135, 136], которые предоставляют доступ к радиоисточникам и распределениям энергии в спектрах галактик.

⁴<http://python.org>

⁵<https://www.djangoproject.com>

⁶<http://goo.gl/EwaaVc>

⁷<http://cats.sao.ru>

⁸<http://sed.sao.ru>

Математическая обработка данных осуществляется с помощью пакета GLESP [65, 69, 89]. Его детальное описание можно найти в главе 1.2.

На рисунке 4.1 графически представлена архитектура базы данных.

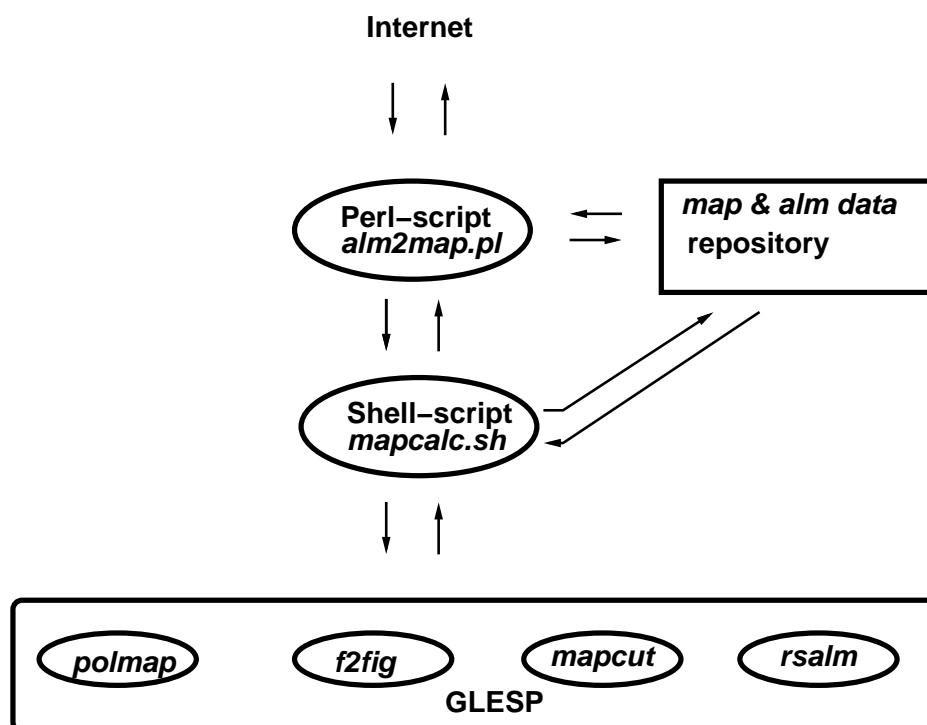


Рисунок 4.1: Структура и система управления базой данных карт и гармоник [127].

Сервер разработан в среде OS GNU/Linux⁹ версии Scientific 6.4¹⁰ на компьютере типа Shuttle SZ68R5 с оперативной памятью 32 GB и жестким диском 2 TB. Информация об имеющихся исходных картах хранится в отдельном файле в виде таблицы и представляет из себя ссылочную базу данных, каждая запись которой состоит из четырех полей:

1. имя карты,

⁹<http://www.gnu.org/gnu/thegnuproject.en.html>

¹⁰<http://www.scientificlinux.org/>

Таблица 4.1: Репозиторий базы данных карт, содержащий их имена, имена файлов с гармониками и картами, а также максимальное разрешение ℓ_{\max} в мультипольном описании.

Имя	$a_{\ell m}$'s	Карта	ℓ_{\max}
WMAP9_ILC	WMAP/alm_ilc_9yr.fts	WMAP/map_ilc_9yr.fts	100
WMAP7_ILC	WMAP/alm_ilc_7yr.fts	WMAP/map_ilc_7yr.fts	100
WMAP5_ILC	WMAP/alm_ilc_5yr.fts	WMAP/map_ilc_5yr.fts	100
WMAP3_ILC	WMAP/alm_ilc_3yr.fts	WMAP/map_ilc_3yr.fts	100
WMAP3_Synch_K	WMAP/alm_synch_k_3yr.fts	WMAP/map_synch_k_3yr.fts	512
WMAP3_FrFr_Q	WMAP/alm_frfr_q_3yr.fts	WMAP/map_frfr_q_3yr.fts	512
WMAP3_Dust_W	WMAP/alm_dust_w_3yr.fts	WMAP/map_dust_w_3yr.fts	512
Faraday_rot	Faraday/alm_faraday.fts	Faraday/map_faraday.fts	256
Haslam	Haslam/alm_haslam.fts	Haslam/map_haslam.fts	1024
Bonn_21cm	Bonn/alm_h1.fts	Bonn/map_h1.fts	2048
Planck_SMICA	Planck/alm_smica.fts	Planck/map_smica.fts	4096
Planck_030	Planck/alm_030.fts	Planck/map_030.fts	4096
Planck_100	Planck/alm_100.fts	Planck/map_100.fts	4096
Planck_217	Planck/alm_217.fts	Planck/map_217.fts	4096

2. имя файла с коэффициентами гармоник,
3. расположение карты в репозитории (базе данных) и
4. максимальное разрешение карты.

Содержание файла представлено в таблице 4.1.

Система управления состоит из трех уровней:

1. нижнего,
2. промежуточного и
3. верхнего.

На нижнем уровне реализована работа с самими картами и файлами с гармониками с помощью пакета GLESP. Промежуточный уровень содержит управляющие скрипты (сценарии) на языках `shell` и `perl` (процедуры `'cmb_calc.sh'` и `'alm2map.pl'` соответственно). Верхний уровень предназначен для предоставления доступа из Интернет через программу-демон `httpd` ОС GNU/Linux (HTTP-сервер Apache).

Определение 3. Демон (*даэмон, божество*) — компьютерная программа в системах класса UNIX, запускаемая самой системой и работающая в фоновом режиме без прямого взаимодействия с пользователем.¹¹

В целом приложение действует по следующей схеме. Из сети приходит запрос, который обрабатывается `httpd`, и передается дальше скрипту `'alm2map.pl'` для обработки полученных данных и преобразования их к виду, который использует `'cmb_calc.sh'`. Оба скрипта обращаются к файлу `alm_descr`, который содержит ссылки на имена файлов. Далее полученный результат возвращается через тот же `perl`-скрипт в виде HTML-страницы, которая содержит ссылки на рассчитанные карты. Схематически это изображено на рисунке 4.1.

Доступ к базе данных

Доступ к базе данных осуществляется посредством двух протоколов: HTTP и FTP.

Стандартная web-страница (рисунок 4.2), которую видит пользователь при получении доступа по HTTP, содержит запросы

- об угловом разрешении (см. главу 1.2),
- о собственных гармонических коэффициентах $a_{\ell m}$ в формате $[\ell \ m \ \text{Re } a_{\ell m} \ \text{Im } a_{\ell m}]$,
- о точечных источниках, которые следует нанести на результирующую карту.

К картам с максимальным разрешением открыт доступ по адресу `anonymous@ftp://ftp.sao.ru/cifs/cmb/cmb/` через FTP.

¹¹<http://goo.gl/DHnNc6>

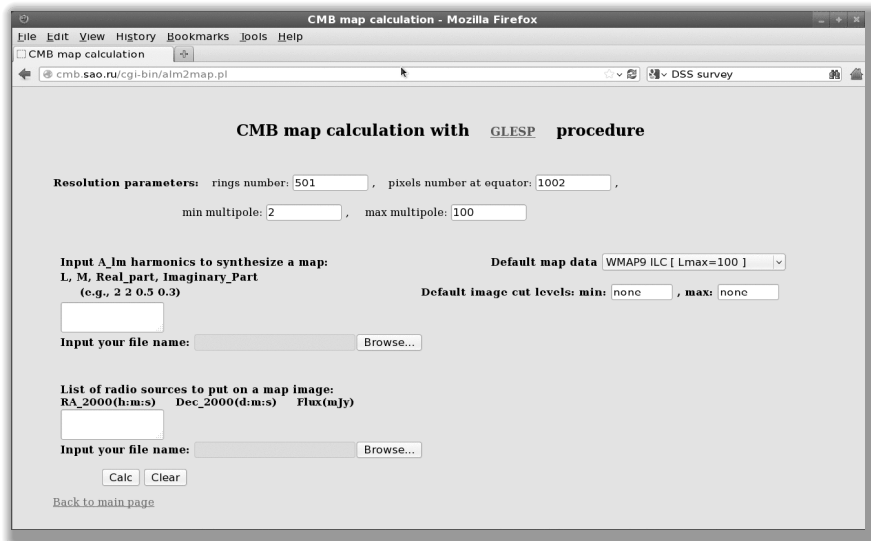


Рисунок 4.2: Web–страница доступа к процедуре синтеза карт из сферических гармоник [127].

4.3 Получение области с заданным разрешением

Выбор области неба с разрешением, задаваемым пользователем, является вычислительной процедурой, аналогичной построению карты на сфере. При необходимости сигнал сглаживается в гармоническом пространстве в соответствии с формулой

$$\hat{a}_{\ell m} = B_{\ell} a_{\ell m}, \quad (4.1)$$

где $a_{\ell m}$ как и везде ранее коэффициенты гармонического разложения входной карты, $B_{\ell} = e^{-\frac{\sigma^2 \ell(\ell+1)}{2}}$ — коэффициенты разложения гауссовой диаграммы направленности с параметром $\sigma = \Theta / \sqrt{8 \ln 2}$ и соответствующей шириной по половинной мощности Θ , $\hat{a}_{\ell m}$ — коэффициенты разложения выходной карты. После выполненных процедур подготовленная карта используется для вырезания выбранной площадки неба. Для представленной задачи разработано отдельное web–приложение 'alm2area', действующее на этом же сервере.

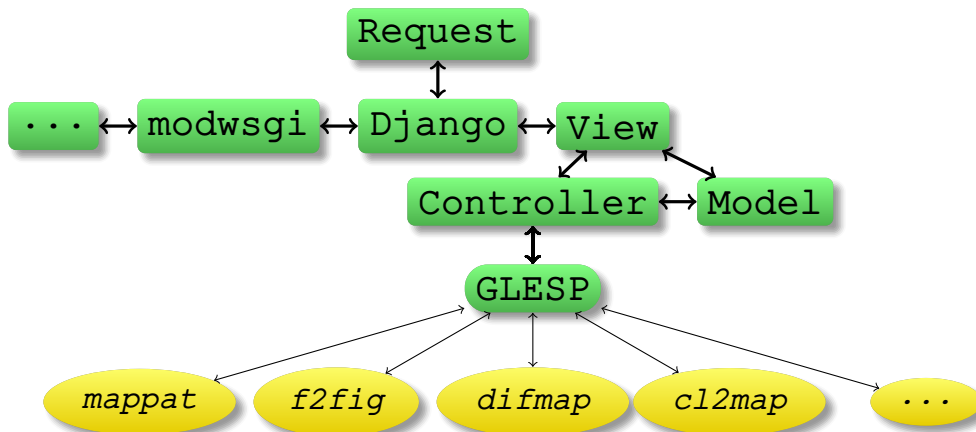


Рисунок 4.3: Архитектура web-приложения для расчета карт по сферическим гармоникам и подготовки выбранных площадок неба [127].

Архитектура приложения

Приложение разработана на языке python 2.7 с использованием фреймворка Django 1.5, распространяемого под лицензией Berkeley Software Distribution (BSD)¹².

При проектировании использовался шаблон Model-View-Controller — Модель-Представление-Контроллер (MVC), выбор которого продиктован Django. Данный шаблон состоит из трех отдельных модулей, которые отвечают за хранение данных, их отображение и обработку. На рисунке 4.3 схематично изображена внутренняя архитектура приложения.

Обработка запроса осуществляется по следующему алгоритму:

1. Django получает запрос извне (httpd) и обрабатывает его;
2. формируется HTML-страница с ответом с помощью моделей и представлений, которые могут обращаться к контроллеру;
3. осуществляется проверка на корректность входных данных;
4. если запрос удалось обработать, то управление передается контроллеру для формирования ответа, иначе выдается сообщение об ошибке;

¹²<http://opensource.org/licenses/BSD-3-Clause>

5. по окончании формирования данных управление возвращается представлению, которое формирует HTML–страницу с результатом.

Контроллер

В качестве контроллера в приложении используется специально разработанный пакет `GlesPy`¹³ [137] (см. главу 5). Он представляет из себя набор классов и функций для работы с утилитами пакета `GLESP` на языке `python 2.6` и выше.

Доступ к приложению осуществляется через web–интерфейс по HTTP. На рисунке 4.4 изображена главная страница приложения. Пользовательское меню позволяет задать

- параметры разрешения карты и диапазон гармоник,
- файл с точечными источниками с весовым коэффициентом,
- файл с маской,
- параметр сглаживания в гармонической области,
- координаты площадки для построения,
- параметры отображения карты в формате `Graphics Interchange Format` — “формат для обмена изображениями” (`GIF`).

В результате выполнения запроса из данного web–приложения (функция `Submit`) выдается изображение выбранной области неба в `GIF`-формате и ссылка для загрузки соответствующего файла с выбранными данными в архивном формате `Basic FITS` [138]. При вводе параметров карты осуществляется автоматический контроль и коррекция ввода данных, определяемых способом пикселизации карт `GLESP`. Основные требования к входным параметрам — соотношение между максимальным мультиполем ℓ_{\max} , количеством пикселей на экваторе N_p и числом колец на сфере N_x , аналогичны указанным в разделе 1.2.

¹³<https://pypi.python.org/pypi/glespy>

The screenshot shows the main interface of the ALM2AREA application, titled "CMB map calculation with GLESP procedure". The interface is organized into several sections:

- Map Parameters:** Includes a dropdown for "Alm file" (set to "WMAP9_ILC-0-100"), input fields for "L_max" (10), "L_min" (1), "nx" (101), and "ny" (202).
- Point Source Data:** Includes a dropdown for "Point source file" (with a "Выберите файл" button), an input field for "Point sources multiplier" (1.0), and a "Submit" button.
- Mask File:** Includes a dropdown for "Mask name".
- Smoothing Parameters:** Includes an input field for "Smooth window".
- Zone Cut Parameters:** Includes input fields for "Min lat", "Max lat", "Min lon", and "Max lon".
- Map View Values Limits:** Includes input fields for "Max value" and "Min value".

A vertical sidebar on the right side of the interface contains a list of options: "Acc", "I", "sor", "wit", "S", "ma", "arc", "Z", "de".

Рисунок 4.4: Главный экран приложения для расчета карт площадок по сферическим гармоникам [127].

Таким образом, реализованная вычислительная web-система обладает уникальным функционалом, необходимым при анализа реликтового излучения.

Глава 5

Пакет для работы со сферическими функциями GlesPy

Эта глава посвящена пакету анализа данных на сфере GlesPy, который был разработан в диссертации. Основная часть программного кода данного пакета основана на GLESP, который был уже частично описан в разделе 1.2. Поэтому здесь будет дано описание основных возможностей GlesPy и его архитектуры.

5.1 Архитектура GlesPy

На данном этапе развития¹ пакет GlesPy представляет из себя интерфейс для процедур пакета GLESP и языка python версии 2.7 и выше. Версия 2.6 поддерживается практически полностью, но на данном этапе есть некоторые ошибки, которые не мешают корректной работе.

GlesPy состоит из двух основных частей: это набор процедур для работы с данными на сфере и набор классов, которые являются основными сущностями данных процедур (карты, наборы гармоник и т.д.). Кроме того, есть и ряд вспомогательных классов, использование которых не предусмот-

¹версия 0.1.7.2

рено отдельно. Классы сущностей оперируют процедурами, поэтому мы будем проводить рассмотрение всего пакета на их основе.

Здесь же упомянем о том, что все классы снабжены автоматическим контролем параметров разрешения, которые выставляются на минимальные допустимые значения, которые были описаны в разделе 1.2, в случае ошибки или если они не были заданы.

Кроме того, имеется ряд инструментов для журналирования вывода промежуточных данных для отладки и их визуализации. Промежуточные данные автоматически сохраняются в оперативной памяти, если это возможно, что значительно ускоряет работу.

Начнем рассмотрение классов с класса карт.

5.2 Класс пиксельных карт `PixelMap`

Данный класс предназначен для работы с пиксельными картами протяженного излучения в схеме пикселизации GLESP (см. раздел 1.2). Его UML-диаграмма (Unified Modeling Language) представлена на рисунке 5.1. Как из нее видно, этот класс обладает следующими возможностями:

- создавать карты из файлов с коэффициентами сферических гармоник,
- создавать GIF-рисунок из карты,
- отображать GIF-рисунок с помощью программы `Eye of GNOME`²,
- складывать карты,
- вычитать карты,
- инвертировать (изменять знак каждого пиксела) карты,
- умножать карты на скаляр,
- получать параметры разрешения карты в виде кортежа,

²<https://wiki.gnome.org/Apps/EyeOfGnome>



Рисунок 5.1: UML-диаграмма класса PixelMap.

- создавать новую карту с вырезанной областью,
- создавать новую карту только из полушария исходной карты,
- получать новую карту, которая является зеркальным отображением исходной относительно центральной плоскости,
- раскалывать карту по сферическим гармоникам,

- получать угловой спектр мощности C_ℓ и D_ℓ^3 ,
- получать карту с наложенной маской.

5.3 Класс для манипуляций с коэффициентами сферических гармоник **Alm**

Со сферическими гармониками можно работать с помощью класса `Alm`. Его структура похожа на структуру класса `PixelMap`. UML-диаграмма показана на рисунке 5.2. Он поддерживает построение карты по коэффициентам гармоник, их сглаживание, получения угловых спектров мощности C_ℓ и D_ℓ , а также ручное обновление данных о разрешении, если они были изменены.

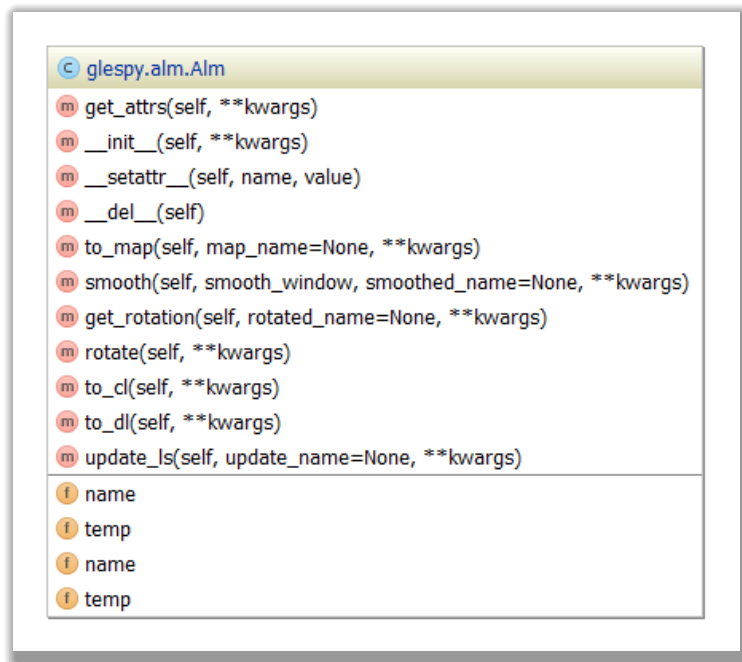


Рисунок 5.2: UML-диаграмма класса `Alm`.

³В виде массива NumPy, <http://numpy.org>

5.4 Класс углового спектра мощности C1

Следующий класс, который будет рассмотрен — класс углового спектра мощности C1. Его структура проще классов, рассмотренных выше. Он имеет три основные возможности — строить случайные гауссовы карты или их коэффициенты гармонического разложения из углового спектра мощности и осуществлять манипуляции с самим спектром мощности как с массивом NumPy. Его UML-диаграмма представлена на рисунке 5.3.

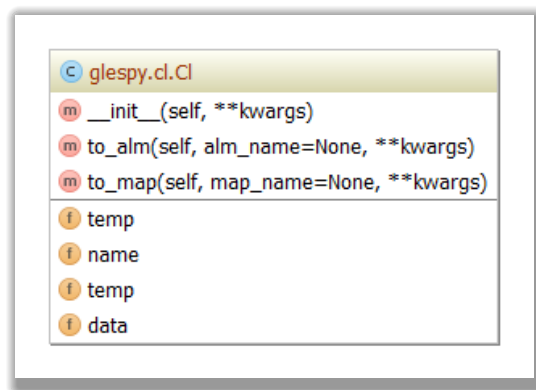


Рисунок 5.3: UML-диаграмма класса C1.

5.5 Класс хранилища точечных источников PointSource

Небольшой класс PointSource предназначен для обработки файлов с точечными источниками, которые задаются в формате пакета GLESP. Его UML-диаграмма, которая изображена на рисунке 5.1, очень проста. Он позволяет создавать пиксельную карту из файла с точечными источниками и/или визуализировать ее.

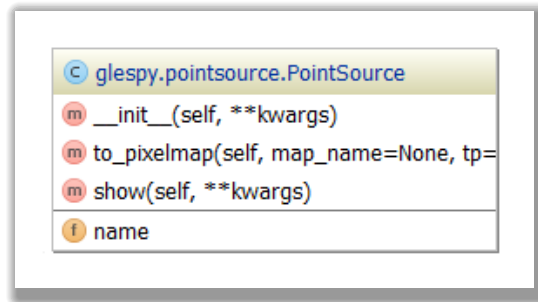


Рисунок 5.4: UML-диаграмма класса PointSource.

5.6 Вспомогательные классы

Здесь будет описано несколько вспомогательных классов, которые отвечают за контроль параметров разрешения и вывод данных об объектах на экран. Схема их наследования изображена на рисунке 5.5. В теории такие классы принято называть примесями⁴ — это абстрактные классы, которые добавляют те или иные свойства своим потомкам.

Класс Printable Данный класс отвечает за вывод дескрипторов класса с их именами и именем класса объекта.

Класс Multipoled Наследники этого класса получают два дескриптора l_{\max} и l_{\min} такие, что для них всегда верно соотношение $l_{\min} \leq l_{\max}$.

Класс Rendered Этот класс унаследован от `Multipoled` и расширяет его еще двумя дескрипторами, которые отвечают за разрешение пиксельных карты — n_x и n_p , для которых выполняется контроль и автоматическая корректировка значения следующим образом:

$$l_{\min} \leq l_{\max}, \quad l_{\max} \leq 2n_x + 1, \quad n_x \leq n_p.$$

⁴Mixin

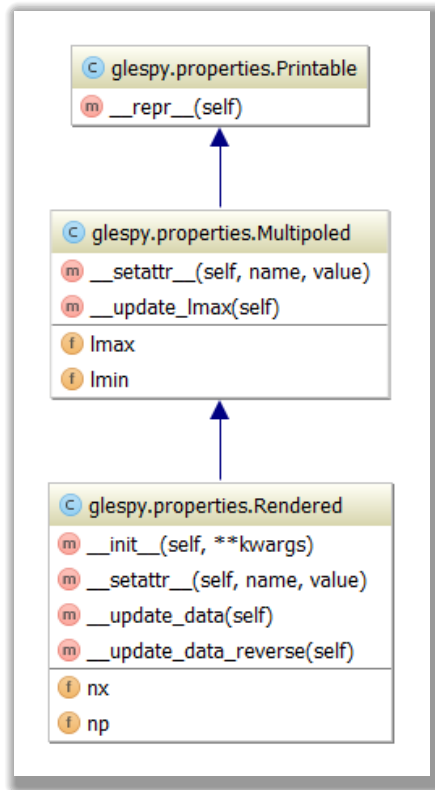


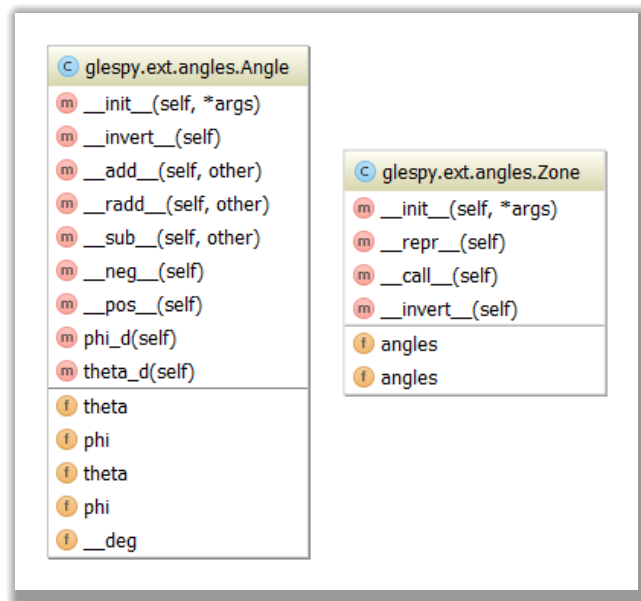
Рисунок 5.5: UML–диаграмма вспомогательных классов GlesPy.

5.7 Расширение: классы `Angle` и `Zone`

В качестве небольшого расширения в пакете GlesPy реализовано два класса для работы с углами на сфере — `Angle` и `Zone`. Первый из них предназначен для вывода данных об угле в формате GLESP и предоставляет возможность арифметических действий с ними. Второй обладает аналогичным функционалом, но для зон на сфере. Их устройство изображено на рисунке 5.6.

Таким образом в пакете GlesPy реализованы все необходимые инструменты для работы с картами реликтового излучения на языке python.

В дальнейшем планируется добавление инструментов для построения графиков и диаграмм и ряда классов и функция, облегчающих моделирова-

Рисунок 5.6: UML-диаграмма классов `Angle` и `Zone`.

ние. Кроме того, для ускорения и удобства использования пакета часть программного кода GLESP будет перенесена прямо в пакет `GlesPy` с использованием генератора интерфейсов для разделяемых библиотек `Simplified Wrapper and Interface Generator (SWIG)`⁵.

⁵<http://www.swig.org/>

Заключение

Итоги исследования

В работе над диссертацией был создан ряд методов (глава 2) и инструментов (главы 4 и 5). Полученные результаты (глава 3) опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, и апробированы на российских и международных школах и конференциях, а также обсуждались на семинарах САО РАН, ГАО РАН, ФТИ им. Иоффе РАН и СПбГУ. Разработанные инструменты свободно доступны в сети Internet.

В главе 3 получены результаты, которые показывают, что в космическом микроволновом фоне на больших масштабах проявляется сигнал компонент Солнечной системы, галактических и внегалактических компонент. Кроме того, получен наибольший масштаб ячейки неоднородности крупномасштабной структуры на эпохи $z = 0.8$ и 1.9 .

Рекомендации

На сегодня электронный архив <http://arXiv.org> содержит более 500, публикаций посвященных негауссовости космического микроволнового фона. Эту тему продолжают активно развивать.

С открытием свободного доступа к архиву данных космической миссии Planck в марте 2013 года появилась возможность исследовать реликтовое излучение на большем разрешении и с большей точностью. Кроме того, команда Planck предоставляет целых четыре карты [11], полученные различными способами, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками.

Результаты наших исследований показали, что карта ILC WMAP содержит вклад фоновых компонент на крупных масштабах. Кроме того, аналогичные результаты, которые были получены по данным Planck [26], показали схожее поведение низких мультиполей реликтового излучения. Поэтому при анализе низких гармоник (например, $\ell = 3, 4, 5, 6, 7$) карт реликтового рекомендуется учитывать, что их фазовые характеристики (положение и ориентация), определяются локальным распределением сигнала.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В дальнейшем планируется применить методы, представленные в диссертации, к данным космического эксперимента Planck. Разработанная система анализа Фурье-образов одномерных сечений может быть приложена к данным обзоров PATAH-600 и космического проекта “Миллиметр”, кроме того, она дает возможность получить дополнительную информацию при поиске симметричных структур, формирующихся в окрестности Солнца и Галактики или являющимися артефактами обработки данных [97]. Использование большего количества независимых наблюдательных данных позволит выбрать правильную гипотезу.

При построении карт мозаичной корреляции использовались данные Planck, SDSS, 2MASS и FSC с различными параметрами сглаживания и окнами корреляции. В дальнейшем представляет интерес использование большего числа каталогов. Кроме того, данные 2MRS содержат источники на красном смещении $z \sim 0.3$. В работе [119] мы использовали шаг для деления на бины $dz = 0.1$, что дало маленький промежуток, для того, чтобы сделать то или иное заключение. В дальнейших исследованиях предполагается провести аналогичные расчеты для меньшего размера бинов.

Основные результаты

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа показано, что одномерные сечения карт реликтового излучения мало чувствительны к изменению космологических параметров.
2. Численные исследования показали, что на низких мультиполях $\ell \leq 100$ в космическом микроволновом фоне присутствует вклад источников Солнечной системы и галактических компонент.
3. Для выполнения поставленных задач были созданы вычислительная web-система анализа данных на сфере и пакет `GlesPy`, предоставляющий возможность использовать процедуры `GLESP` на языке `python`.

Эпоху, в которую мы живем, называют эпохой прецизионной космологии благодаря таким космическим экспериментам, как WMAP и Planck. На этих обсерваториях были произведены наблюдения космического микроволнового фона с большой точностью и высоким угловым разрешением (до $\ell_{max} = 2200$ [11]). Однако, карты реликтового излучения, которые они дали на выходе, в некоторой степени статистически анизотропны, что может говорить о вкладе фоновых компонент или сложных космологических сценариях. Поэтому изучение свойств реликтового излучения и развитие математического аппарата разделения фоновых компонент остается приоритетной задачей космологии и по сей день.

Благодарности

Автор приносит свою глубокую благодарность научному руководителю О.В. Верходванову и его жене Н.В. Верходановой, а также сотрудникам САО и друзьям: А. Валееву, С. Карпову, К. Кучаевой, О. Марьевой, О.Н. Шолуховой, О.А. Глазутдиновой, И.П. Костюк, Р.И. Уклеину, А. Моисееву, С.А. Трушкину. Особая благодарность моим родителям Н.Ф. Васильевой и В.И. Найнеду и братьям С.В. и А.В. Найденым, которые не раз поддерживали меня в трудную минуту.

Список сокращений

BSD	Berkeley Software Distribution, с. 85
CAMB	Code for Anisotropies in the Microwave Background, сс. 33, 34
CATS	Astrophysical CATalogs support System, с. 80
CMB	Cosmic Microwave Background, сс. 3, 6, 16, 20–22, 25, 26, 32, 35, 36, 39, 44, 52, 58, 67–69, 73, 75, 76, 80, 101, 102, 105, 107
COBE	The Cosmic Background Explorer, с. 19
DSS	Digitized Sky Survey, с. 79
FFTW	Fast Fourier Transform in the West, с. 23
FIRST	Faint Images of the Radio Sky at Twenty centimeters, сс. 57, 58, 108
FITS	Graphics Interchange Format, с. 86
FSC	Faint Source Catalog, сс. 13, 45, 49, 52, 53, 55–58, 97, 102, 103, 107, 108
FTP	File Transfer Protocol, с. 83
GIF	Graphics Interchange Format — “формат для обмена изображениями”, сс. 86, 89
GLESP	Gauss–Legendre Sky Pixelization, сс. 12, 20–23, 33, 42, 78, 79, 81, 82, 86, 88, 89, 92, 94, 95, 98
GlesPy	Gauss–Legendre Sky Pixelization with Python, сс. 3, 12, 13, 25, 86, 88, 94, 95, 98, 106
GNU	рекурсивный акроним от англ. GNU’s Not UNIX — GNU не UNIX, с. 82
HTML	HyperText Markup Language, сс. 83, 85, 86
HTTP	HyperText Transfer Protocol, сс. 82, 83, 86
ILC	Internal Linear Combination, сс. 2, 8–10, 13, 16, 26, 31, 34, 36, 37, 39–41, 44, 45, 47, 49, 50, 52–67, 69, 72, 74, 75, 77, 97, 102–108
IRAS	InfraRed Astronomical Satellite, сс. 45, 56–59, 107, 108
LAMBDA	Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis, с. 33
Λ CDM	Λ Cold Dark Matter, сс. 7, 8, 12, 34, 42, 43, 49, 50, 52, 60, 62, 64–67, 73, 74, 76, 77, 101–104, 106, 107
2MASS	Two Micron All–Sky Surve, сс. 39, 46, 52, 71, 76, 97
2MASX	2Micron All–Sky Survey, Extended source catalogue, сс. 13, 46, 53, 54, 71, 102, 103
2MRS	The 2MASS Redshift Survey, сс. 3, 16, 68–71, 73, 74, 76, 77, 97, 105, 106
MVC	Model–View–Controller — Модель–Представление–Контроллер, с. 85
NRAO	National Radio Astronomy Observatory, с. 100

NVSS	NRAO VLA Sky Survey, cc. 10, 57, 58, 108
PCCS	Planck Catalogue of Compact Sources, cc. 13, 45
PSC	Point Source Catalog, cc. 46, 71
QSC	Quadrilateralized Sky Cube, c. 19
ROSAT	Röntgensatellit, c. 79
RZF	RATAN-600 Zenith Field, c. 30
SDSS	Sloan Digital Sky Survey, cc. 3, 13, 39, 68, 69, 71–75, 79, 97, 105, 108
SED	Spectral Energy Distributions, c. 80
SMHW	Spherical Mexican Hat Wavelet, c. 10
SWIG	Simplified Wrapper and Interface Generator, c. 95
UML	Unified Modeling Language, cc. 89–95, 106
VLA	Very Large Array, c. 100
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, cc. 2, 6, 8–11, 13, 16, 26, 30–34, 36, 37, 39–41, 45, 50, 52, 54, 55, 58, 60, 61, 63–65, 67, 69, 72, 74–77, 79, 97, 98, 101–106
WoS	Web of Science, c. 14
XSC	eXtended Source Catalog, cc. 46, 71

Список рисунков

1	Угловой спектр мощности, полученный командой Planck до $\ell = 2200$ [11]. До $\ell = 50$ по оси абсцисс логарифмический масштаб, а дальше линейный. Семь теоретически рассчитанных в Λ CDM-космологической модели акустических пиков совпадают с наблюдательными данными.	8
2	Сверху холодное пятно ($b = -57^\circ$, $l = 209^\circ$ размер области $43^\circ \times 43^\circ$) по данным WMAP, в середине шаблон текстуры, внизу — холодное пятно после вычитания шаблона [50].	11
2.1	Область одномерного сечения на склонении $\delta \sim 41^\circ$ на карте WMAP канала K (23 GHz) в галактической системе координат. Верхний уровень отображения составляет 0.2 мК, чтобы подчеркнуть область Галактического излучения [88].	31
2.2	Сечения неба на склонении $\delta \sim 41^\circ$. На верхнем графике данные SMB WMAP. На трех нижних данные пыли, свободно-свободного и синхротронного излучения соответственно. Максимум на распределении соответствует плоскости Галактики. На SMB же наблюдается локальный минимум излучения [71].	32
2.3	Карта канала Q WMAP с разрешением $n_x = 2049$, $n_p = 4098$ [88].	33
2.4	Карта канала V WMAP с разрешением $n_x = 2049$, $n_p = 4098$ [88].	33
2.5	Модельный спектр мощности для трех космологических моделей. Случай $\Omega_b = 0.1$ отмечен сплошной линией, $\Omega_\Lambda = 0.5$ — пунктиром, $n_s = 0.5$ — штрих-пунктиром [88].	35
2.6	Пример модельной карты для $\Omega_b = 0.01$ до разделения компонент [88].	37

- 2.7 Пример модельной карты для $\Omega_b = 0.01$ после разделения компонент [88]. 37
- 2.8 Примеры спектров одномерных сечений для некоторых значений космологических параметров (слева направо соответственно $\Omega_b = 0.0462$, $\Omega_\Lambda = 0.735$ и $n_s = 0.96$). Спектры построены для модельных данных без добавления фоновых компонент и их выделения. Сплошной линией отмечено среднее значение для 100 случайных моделей. Серый фон отображает 1σ -разброс. Пунктир соответствует сечению карты ILC WMAP [88]. 37
- 3.1 Карта нечетных гармоник канала V (слева) и ILC (справа) WMAP [97]. 41
- 3.2 Отобранные зоны в галактической системе координат. Слева только нечетные гармоники, справа все гармоники карты ILC WMAP $\ell \leq 100$ [97]. 41
- 3.3 Результат корреляции для первой области в галактических координатах с удалением одного мультиполя. По оси абсцисс указан номер вычтенного мультиполя. На оси ординат отложены коэффициенты корреляции. Штрихованными линиями указано среднее значение и границы на уровне 1σ для аналогичных модельных данных в Λ CDM-космологии [97]. 43
- 3.4 Карта мультиполей $\ell = 5, 6, 7$ из данных CMB ILC в галактической координатной системой. На изображение наложена сетка эклиптической системы координат [98]. 44
- 3.5 Положение объектов каталога FSC на сфере в галактических координатах. Показаны источники на длине волны $100 \mu\text{m}$. Полоса в плоскости Галактики $|b| < 10^\circ$ экранирована [98]. 45
- 3.6 Карта объектов 2MASX в галактической системе координат [98]. 46

- 3.7 Положение источников каталога Planck на сфере в галактических координатах. Справа налево сверху вниз источники на частотах 30 GHz (705 объектов), 44 GHz (452), 70 GHz (599), 100 GHz (1381), 143 GHz (1764), 217 GHz (5470), 353 GHz (6984), 545 GHz (7223) и 857 GHz (8988 объектов) [98]. 48
- 3.8 Угловые спектры мощности карты корреляций данных Planck и ILC WMAP для различных корреляционных окон (левый столбец 300', центральный 600', правый 900'; в строках данные для частотных каналов на 30 GHz, 44 GHz, 70 GHz, 100 GHz, 143 GHz). 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 [98]. 50
- 3.9 Шестая гармоника $\ell = 6$ различных карт: сверху слева корреляционной карты FSC vs ILC (с эклиптической координатной сеткой), сверху справа корреляционной карты Planck vs ILC (с эклиптической координатной сеткой), снизу карты ILC WMAP [98]. 52
- 3.10 Слева гармоника $\ell = 4$ карты корреляции 2MASX vs ILC [98], справа карта эффекта Сакса-Вольфа по данным [102]. 54
- 3.11 Справа: карта Магелланова Потока (в Южном галактическом полушарии) по данным наблюдений на длине волны 21 см на радиотелескопах Грин Бэнк и Аресибо. Рисунок воспроизведен из работы [103]. Слева: карта 3-ей (217 GHz, $w = 600'$), гармоники корреляционного сигнала Planck vs ILC, соответствующей аномальному пику на рисунке 3.8 для корреляционных окон $w = 600'$ на различных частотах [98]. Карты даны в галактических координатах. 54
- 3.12 Номера исследуемых зон (горячих и холодных пятен) для 6-го мультиполя карты WMAP ILC. На карту наложена галактическая координатная сетка [105]. 58

3.13	Мультиполь $\ell = 3$ карт корреляций ILC с картой положений источников Planck на частотах 30 GHz (слева), 217 GHz (в центре) и 847 GHz (справа) в галактической системе координат. На правую карту наложена сетка экваториальной системы координат. Ее полюса попадают на особые (седловидные) точки [105].	59
3.14	Слева направо: карта сигнала микроволнового фона WMAP ILC, карта с четным отображением ILC южной полусферы и карта с нечетным отображением [108].	61
3.15	Примеры трех модельных спектров мощности в Λ CDM-космологии [108].	62
3.16	Σ_1 -карта, рассчитанная для данных ILC WMAP с эклиптической координатной сеткой [108].	63
3.23	Диполь Σ_1 -карты ILC WMAP с эклиптической сеткой координат [108].	63
3.17	Σ_1 -карта для случайной гауссовой модели [108].	64
3.18	Карта канала V WMAP [108].	64
3.19	Σ_1 -карта, рассчитанная для канала V WMAP [108].	64
3.20	Σ_2 -карта рассчитанная для данных ILC WMAP с эклиптической сеткой координат [108].	65
3.21	Σ_2 -карта рассчитанная для канала W WMAP с эклиптической сеткой координат [108].	65
3.25	Диаграмма локальных экстремумов Σ_1 -карты модельных данных по Λ CDM-космологии [108].	65
3.22	Σ_2 -карта для случайного гауссового поля в Λ CDM-космологии [108].	66
3.24	Диаграмма локальных экстремумов Σ_1 -карты ILC. Минимумы помечены плюсами, максимумы крестами [108].	66
3.26	Квадруполь Σ_2 -карты ILC WMAP [108].	67
3.27	Квадруполь Σ_2 -карты канала W WMAP [108].	67

- 3.28 Положение объектов каталога 2MRS на сфере в галактических координатах. На верхнем левом рисунке объекты из диапазонов $0 < z < 0.1$, на верхнем правом — из диапазона $0.1 \leq z < 0.2$, на нижнем — $0.2 \leq z < 0.3$ [119]. 70
- 3.29 Примеры карт с положением объектов каталога SDSS на сфере в галактических координатах. Сверху вниз слева направо: объекты из диапазонов $0 \leq z < 0.1$, $2.0 \leq z < 2.1$, $4.0 \leq z < 4.1$, $6.0 \leq z < 6.1$ [119]. 72
- 3.30 Примеры карт мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога 2MRS (объекты из диапазона $0 \leq z < 0.1$) для различных окон корреляции (сверху вниз: $300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах. Область Галактики экранирована маской [119]. 74
- 3.31 Примеры карт мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога SDSS (объекты из диапазона $1 \leq z < 1.1$) для различных окон (сверху вниз: $300'$, $600'$, $900'$) на сфере в галактических координатах. Зоны отсутствия наблюдений в обзоре SDSS экранированы маской [119]. 74
- 3.32 Примеры угловых спектров мощности для заданных гармоник карты корреляций данных SDSS (плотности потока в фильтре r , объекты из диапазона $1 \leq z < 1.1$) и ILC WMAP. Слева направо сверху вниз: (1) рисунок “эволюционной” корреляции $K_{\tilde{\ell}}(z, \ell)$, где $\tilde{\ell} = 4$ гармоника из корреляционной карты, $\ell = 50$ — гармоника исходной карты CMB, размер окно корреляции выбран $\omega = 300'$, амплитуда сигнала выше уровня 3σ ; (2) корреляция $K_{\tilde{\ell}}(z, \ell)$, $\tilde{\ell} = 11$, $\ell = 30$, $\omega = 600'$, уровень $> 2\sigma$; (3) $\tilde{\ell} = 3$, $\ell = 100$, $\omega = 900'$, уровень $> 3\sigma$; (4) $\tilde{\ell} = 4$, $\ell = 100$, $\omega = 600'$, уровень $> 3\sigma$. Наблюдаемые пики, выходящие за 2σ -уровень разброса, соответствуют корреляционным масштабам с выделенным пространственным размером на данном красном смещении [119]. 75

3.33	Примеры гистограмм распределения значения пикселей K карты корреляций данных 2MRS (плотности потока в фильтре Js, объекты из диапазона $0 \leq z < 0.1$) и ILC WMAP (данные показаны пунктирной линией) для различных корреляционных окон (слева направо — 300', 600', 900'). Серым фоном отмечены границы $\pm 1\sigma$ -разброса при корреляциях данных 2MRS с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в Λ CDM-космологической модели [119].	77
4.1	Структура и система управления базой данных карт и гармоник [127].	81
4.2	Web-страница доступа к процедуре синтеза карт из сферических гармоник [127].	84
4.3	Архитектура web-приложения для расчета карт по сферическим гармоникам и подготовки выбранных площадок неба [127].	85
4.4	Главный экран приложения для расчета карт площадок по сферическим гармоникам [127].	87
5.1	UML-диаграмма класса PixelMap.	90
5.2	UML-диаграмма класса Alm.	91
5.3	UML-диаграмма класса Cl.	92
5.4	UML-диаграмма класса PointSource.	93
5.5	UML-диаграмма вспомогательных классов GlesPy.	94
5.6	UML-диаграмма классов Angle и Zone.	95

Список таблиц

- 3.1 Номера пар зон в галактических координатах, их форма и координаты: “с” - круг (параметры $lat/-lat$, lon , $radius$ соответственно), “r” — прямоугольник (параметры $lat1/-lat1$, $lon1$, $lat2/-lat2$, $lon2$ соответственно), где (lat, lon) — галактические широта и долгота и “-lat” — широта симметричной зоны. Несколько площадок под одним номером обозначают комбинированную зону. 42
- 3.2 Вероятности случайного появления мощных гармоник в корреляциях исследуемых каталогов с картами случайного гауссова поля CMB в космологии Λ CDM. 52
- 3.3 Фазы ψ_{6m} мод мультиполя $\ell = 6$ (в радианах) для данных карты ILC и карт корреляции сигнала ILC с положением объектов FSC IRAS на длинах волн ($12 \mu m$, $25 \mu m$ и $60 \mu m$) и с положением объектов Planck на частотах ($217 GHz$, $353 GHz$ и $545 GHz$). В первом столбце приведены названия карт (M_c —карта корреляций). В последнем столбце приведены величины средних углов (в радианах) 6-го мультиполя исследуемых карт, согласно уравнению (3.3) 56

- 3.4 Количество объектов, расположенных в горячих и холодных пятнах 6-го мультиполя ILC, из каталогов FIRST [104], NVSS, Planck и FSC IRAS. Номера пятен, соответствующих рисунку 3.12, приведены в первом столбце. Символ рядом с номером пятна является характеристикой экстремума: h — максимум, c — минимум. Во втором столбце даны галактические координаты центров пятен. Пятна No. 10, 11, 12, 13 и 14 пропущены, так как находятся в плоскости Галактики и в анализе не участвовали. Шестое пятно совпадает с положением Большого Магелланова Облака (размер галактики БМО $10^{\circ}75 \times 9^{\circ}17$). Отметка “-” около числа источников в колонке FIRST показывает, что подсчет источников неполный из-за неполноты обзора. Знак “-” в столбце означает отсутствие данных в обзоре (зона вне наблюдений). 57
- 3.5 Фазы мод октуполя $\ell = 3$ (в радианах) карт корреляции сигнала ILC с положением источников каталога Planck. В первом столбце приведены частоты миссии Planck. В последнем столбце приведены величины (в радианах) средних углов (см. уравнение 3.3) октуполя исследуемых карт. 59
- 3.6 Число объектов (N) SDSS в разных диапазонах красных смещений z , отобранных для построения карт. 69
- 3.7 Номера мультиполей (левая колонка) и соответствующие им угловые масштабы (правая колонка). 73
- 4.1 Репозиторий базы данных карт, содержащий их имена, имена файлов с гармониками и картами, а также максимальное разрешение ℓ_{\max} в мультипольном описании. 82

Литература

1. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results / C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw et al. // *ApJS*. 2003. Vol. 148. P. 1–27.
2. Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Temperature Analysis / G. Hinshaw, M. R. Nolte, C. L. Bennett et al. // *ApJS*. 2007. Vol. 170. P. 288–334.
3. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Data Processing, Sky Maps, and Basic Results / G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill [и др.] // *ApJS*. 2009. Т. 180. С. 225–245.
4. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results / N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley et al. // *ApJS*. 2011. Vol. 192. P. 14.
5. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results / C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland et al. // *ApJS*. 2013. Vol. 208. P. 20.
6. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results / G. Hinshaw, D. Larson, E. Komatsu et al. // *ApJS*. 2013. Vol. 208. P. 19.
7. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Galactic Foreground Emission / B. Gold, N. Odegard, J. L. Weiland et al. // *ApJS*. 2011. Vol. 192. P. 15.

8. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Power Spectra and WMAP-derived Parameters / D. Larson, J. Dunkley, G. Hinshaw et al. // *ApJS*. 2011. Vol. 192. P. 16.
9. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Are There Cosmic Microwave Background Anomalies? / C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw et al. // *ApJS*. 2011. Vol. 192. P. 17.
10. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Source Catalog / E. L. Wright, X. Chen, N. Odegard et al. // *ApJS*. 2009. Vol. 180. P. 283–295.
11. Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // *ArXiv e-prints*. 2013.
12. Planck 2013 results. XXIII. Isotropy and statistics of the CMB / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // *ArXiv e-prints*. 2013.
13. Planck 2013 results. II. Low Frequency Instrument data processing / Planck Collaboration, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan et al. // *ArXiv e-prints*. 2013.
14. Planck 2013 results. VI. High Frequency Instrument data processing / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // *ArXiv e-prints*. 2013.
15. Planck 2013 results. XI. All-sky model of thermal dust emission / Planck Collaboration, A. Abergel, P. A. R. Ade et al. // *ArXiv e-prints*. 2013.
16. Planck 2013 results. XII. Component separation / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // *ArXiv e-prints*. 2013.
17. Planck 2013 results. XIII. Galactic CO emission / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // *ArXiv e-prints*. 2013.
18. Planck 2013 results. XIV. Zodiacal emission / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // *ArXiv e-prints*. 2013.

19. Planck 2013 results. XV. CMB power spectra and likelihood / Planck collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
20. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
21. Planck 2013 results. XVII. Gravitational lensing by large-scale structure / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
22. Planck 2013 results. XVIII. Gravitational lensing-infrared background correlation / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
23. Planck 2013 results. XIX. The integrated Sachs-Wolfe effect / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
24. Planck 2013 results. XX. Cosmology from Sunyaev-Zeldovich cluster counts / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
25. Planck 2013 results. XXII. Constraints on inflation / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
26. Planck 2013 Results. XXIV. Constraints on primordial non-Gaussianity / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
27. Planck 2013 results. XXVI. Background geometry and topology of the Universe / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
28. Planck 2013 results. XXVIII. The Planck Catalogue of Compact Sources / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.

29. Planck 2013 results. XXIX. Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
30. Planck 2013 results. XXI. Cosmology with the all-sky Planck Compton parameter Y -map / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // ArXiv e-prints. 2013.
31. Зельдович Я. Б. "Горячая" модель Вселенной // Успехи физических наук. 1966. Т. 89. С. 648.
32. Пензиас А. Происхождение элементов // Успехи физических наук. 1979. Vol. 129, no. 12. P. 581–593. URL: <http://ufn.ru/ru/articles/1979/12/b/>.
33. Смут III Дж. Ф. "Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное значение"-// Успехи физических наук. 2007. Т. 177. С. 1294.
34. Starobinskiĭ A. A. Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. 1979. Vol. 30. P. 682.
35. Sato K. First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe // MNRAS. 1981. Vol. 195. P. 467–479.
36. Linde A. D. A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems // Physics Letters B. 1982. Vol. 108. P. 389–393.
37. Cosmic Variance in the Great Observatories Origins Deep Survey / R. S. Somerville, K. Lee, H. C. Ferguson et al. // ApJ. 2004. Vol. 600. P. L171–L174.
38. Allen T. J., Grinstein B., Wise M. B. Non-gaussian density perturbations in inflationary cosmologies // Physics Letters B. 1987. Vol. 197. P. 66–70.
39. Linde A., Mukhanov V. Non-Gaussian isocurvature perturbations from inflation // Phys. Rev. D. 1997. Vol. 56. P. 535.

40. Bernardeau F., Uzan J.-P. Non-Gaussianity in multifield inflation // Phys. Rev. D. 2002. Vol. 66, no. 10. P. 103506.
41. Non-Gaussianity of the Derived Maps from the First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Data / L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov et al. // ApJ. 2003. Vol. 590. P. L65–L68.
42. Naselsky P. D., Doroshkevich A. G., Verkhodanov O. V. Phase Cross-Correlation of the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Internal Linear Combination Map and Foregrounds // ApJ. 2003. Vol. 599. P. L53–L56.
43. Phase correlations in cosmic microwave background temperature maps / P. Coles, P. Dineen, J. Earl et al. // MNRAS. 2004. Vol. 350. P. 989–1004.
44. Land K., Magueijo J. Examination of Evidence for a Preferred Axis in the Cosmic Radiation Anisotropy // Physical Review Letters. 2005. Vol. 95, no. 7. P. 071301.
45. Land K., Magueijo J. Is the Universe odd? // Physical Review D. 2005. Vol. 72, no. 10. P. 101302.
46. Kim J., Naselsky P. Anomalous parity asymmetry of WMAP 7-year power spectrum data at low multipoles: Is it cosmological or systematics? // Phys. Rev. D. 2010. Vol. 82, no. 6. P. 063002.
47. Detection of a non-Gaussian spot in WMAP / M. Cruz, E. Martínez-González, P. Vielva et al. // MNRAS. 2005. Vol. 356. P. 29–40.
48. Dodelson S. Modern cosmology. 2003.
49. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. «Мир», 2005. С. 671.
50. A Cosmic Microwave Background Feature Consistent with a Cosmic Texture / M. Cruz, N. Turok, P. Vielva et al. // Science. 2007. Vol. 318. P. 1612.
51. The NRAO VLA Sky Survey / J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al. // AJ. 1998. Vol. 115. P. 1693–1716.

52. Rudnick L., Brown S., Williams L. R. Extragalactic Radio Sources and the WMAP Cold Spot // *ApJ*. 2007. Т. 671. С. 40–44.
53. П. Д. Насельский Д. И. Новиков И. Д. Новиков. Реликтовое излучение вселенной / под ред. академика Н.С. Кардашева. М.: Наука, 2003.
54. Rice S. O. Mathematical Analysis of Random Noise // *Bell Systems Tech. J.*, Volume 23, p. 282-332. 1944. Vol. 23. P. 282–332.
55. Rice S. O. Mathematical Analysis of Random Noise-Conclusion // *Bell Systems Tech. J.*, Volume 24, p. 46-156. 1945. Vol. 24. P. 46–156.
56. The statistics of peaks of Gaussian random fields / J. M. Bardeen, J. R. Bond, N. Kaiser et al. // *ApJ*. 1986. Vol. 304. P. 15–61.
57. Bond J. R., Efstathiou G. The statistics of cosmic background radiation fluctuations // *MNRAS*. 1987. Vol. 226. P. 655–687.
58. Abbott L. F., Wise M. B. Constraints on generalized inflationary cosmologies // *Nuclear Physics B*. 1984. Vol. 244. P. 541–548.
59. Knox L. E. Determination of Inflationary Observables by Cosmic Microwave Background Experiments. Ph.D. thesis: THE UNIVERSITY OF CHICAGO. 1995.
60. O'Neill E., Laubscher R., DIV. C. S. C. S. S. M. S. S. Extended Studies of a Quadrilateralized Spherical Cube Earth Data Base. Defense Technical Information Center, 1976. URL: <http://books.google.ru/books?id=z2WctgAACAAJ>.
61. Greisen E. W., Calabretta M. Representations of Celestial Coordinates in FITS // *American Astronomical Society Meeting Abstracts #182*. Vol. 25 of *Bulletin of the American Astronomical Society*. 1993. P. 808.
62. Feasibility Study of a Quadrilateralized Spherical Cube Earth Data Base: Final Report / F. Chan, E. O'Neill, C. S. C. S. S. M. S. S. DIV. et al. EPRF technical report. Computer Sciences Corporation, System Sciences Division, 1975. URL: <http://books.google.ru/books?id=94OWNwAACAAJ>.

-
63. Crittenden R. G., Turok N. G. Exactly Azimuthal Pixelizations of the Sky // ArXiv Astrophysics e-prints. 1998.
 64. Tegmark M. An Icosahedron-Based Method for Pixelizing the Celestial Sphere // ApJ. 1996. Vol. 470. P. L81.
 65. The Gauss-Legendre Sky Pixelization for the CMB Polarization Glesp-Pol Errors due to Pixelization of the CMB Sky / A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky et al. // International Journal of Modern Physics D. 2011. Vol. 20. P. 1053–1078.
 66. First Release of Gauss-Legendre Sky Pixelization (GLESP) software package for CMB analysis / A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov et al. // ArXiv Astrophysics e-prints. 2005.
 67. GLESP package for full sky CMB maps data analysis and its realization in the FADPS data processing system. / O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky et al. // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. 2005. Vol. 58. P. 40–50.
 68. Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling et al. 1992.
 69. Gauss-Legendre Sky Pixelization (glesp) for CMB Maps / A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov et al. // International Journal of Modern Physics D. 2005. Vol. 14. P. 275–290.
 70. Frigo M., Johnson S. G. "The Fastest Fourier Transform in the West" // Massachusetts Institute of Technology. 1997. Vol. report MIT-LCS-TR-728.
 71. Khabibullina M. L., Verkhodanov O. V., Parijskij Y. N. Properties of one-dimensional sections of WMAP maps at the declination $\delta = 41^\circ$ // Astrophysical Bulletin. 2008. Vol. 63. P. 95–101.
 72. Khabibullina M. L., Verkhodanov O. V., Parijskij Y. N. // Proc. Int. Conf. on Problems of Practical Cosmology. 2008.

73. Verkhodanov O. V., Khabibullina M. L., Majorova E. K. Tessellated mapping of cosmic background radiation correlations and source distributions // *Astrophysical Bulletin*. 2009. Vol. 64. P. 263–269.
74. GRB sky distribution puzzles / O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina et al. // *Astrophysical Bulletin*. 2010. Vol. 65. P. 238–249.
75. Верходанов О. В. Поиск негауссовости в наблюдательных данных по реликтовому микроволновому фону // *Успехи физических наук*. 2012. Т. 182. С. 1177.
76. Naselsky P. D., Verkhodanov O. V., Nielsen M. T. B. Instability of reconstruction of the low CMB multipoles // *Astrophysical Bulletin*. 2008. Vol. 63. P. 216–227.
77. On the antenna beam shape reconstruction using planet transit / P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, P. R. Christensen et al. // *Astrophysical Bulletin*. 2007. Vol. 62. P. 285–295.
78. *Астрономия. Век XXI* / В. А. Батулин, Л. М. Гиндилис, Ю. Н. Ефремов [и др.]; под ред. В.Г. Сурдин. Век 2, 2008.
79. Naiden Y. V., Verkhodanov O. V. Determination of microwave background map inhomogeneity from angular power spectrum // *Astrophysical Bulletin*. 2011. Vol. 66. P. 345–354.
80. The one-dimensional Fourier representation and large angular scale foreground contamination in the three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe data / L.-Y. Chiang, P. Coles, P. D. Naselsky et al. // *J. Cosmology Astropart. Phys.*. 2007. Vol. 1. P. 21.
81. The Cosmological Gene Project: Cluster Analysis of the Atmospheric Fluctuations on Arcmin-Scale Imaging of the Cosmic Microwave Background / H. E. Jørgensen, E. V. Kotok, I. D. Novikov et al. // *International Journal of Modern Physics D*. 2000. Vol. 9. P. 127–142.

82. Understanding the WMAP Cold Spot mystery / P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles et al. // *Astrophysical Bulletin*. 2010. Vol. 65. P. 101–120.
83. Novikov D. I., Jorgensen H. E. A Theoretical Investigation of the Topology of the Cosmic Microwave Background Anisotropy on the Scale approximately 1 degrees // *ApJ*. 1996. Vol. 471. P. 521.
84. Semenova T. A., Bursov N. N., Parijskij Y. N. Galactic synchrotron emission according to the data of the RZF survey conducted at the RATAN-600 radio telescope // *Astrophysical Bulletin*. 2009. Vol. 64. P. 270–275.
85. Multi-frequency survey of background radiations of the Universe. The "Cosmological Gene" project. First results / Y. N. Parijskij, M. G. Mingaliev, N. A. Nizhel'Skii et al. // *Astrophysical Bulletin*. 2011. Vol. 66. P. 424–435.
86. Small-scale galactic emission fluctuation observations with RATAN-600 radio telescope / V. A. Stolyarov, Y. N. Parijskij, N. N. Bursov et al. // *Astrophysical Bulletin*. 2012. Vol. 67. P. 29–43.
87. A RATAN-600 Zenith-Field sky survey. Catalog of radio sources / N. N. Bursov, Y. N. Pariiskii, E. K. Maiorova et al. // *Astronomy Reports*. 2007. Vol. 51. P. 197–214.
88. Naiden Y. V., Verkhodanov O. V. Determination of microwave background map inhomogeneity from angular power spectrum // *Astrophysical Bulletin*. 2011. Vol. 66. P. 345–354.
89. GLESP package for full sky CMB maps data analysis and its realization in the FADPS data processing system. / O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky et al. // *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*. 2005. Vol. 58. P. 40–50.
90. Lewis A., Challinor A., Lasenby A. Efficient Computation of Cosmic Microwave Background Anisotropies in Closed Friedmann-Robertson-Walker Models // *ApJ*. 2000. Vol. 538. P. 473–476.

91. Seljak U., Zaldarriaga M. A Line-of-Sight Integration Approach to Cosmic Microwave Background Anisotropies // *ApJ*. 1996. Vol. 469. P. 437.
92. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results / N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley et al. // *ApJS*. 2011. Vol. 192. P. 14.
93. Doroshkevich A., Verkhodanov O. CMB component separation in the pixel domain // *Phys. Rev. D*. 2011. Vol. 83, no. 4. P. 043002.
94. Naiden Y. V., Verkhodanov O. V. Power spectrum distortions in CMB map one-dimensional cross-sections depending on the cosmological model. II // *Astrophysical Bulletin*. 2013. Vol. 68. P. 465–470.
95. Verkhodanov O. V., Naselsky P. D., Chiang L.-Y. Review of non-Gaussianity at low and high multipoles from WMAP data // *Particles and Cosmology*, Proc. 14th Internat. School. 2008. P. 119.
96. Verkhodanov O. V. CMB data analysis: methods and problems // Proc. Internat. Conf. “Problems of Practical Cosmology”. 2008. P. 206.
97. Berkutov V. S., Naiden Y. V., Verkhodanov O. V. Axial symmetries in WMAP ILC data // *Astrophysical Bulletin*. 2010. Vol. 65. P. 187–195.
98. Verkhodanov O. V., Naiden Y. V. Does the contribution of infrared and submillimeter sources reveal itself at low harmonics of the CMB? // *Astrophysical Bulletin*. 2012. Vol. 67. P. 1–16.
99. Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases. Volume 1: Explanatory supplement / Ed. by C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing et al. Vol. 1, 1988.
100. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) / M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening et al. // *The Astronomical Journal*. 2006. Vol. 131. P. 1163–1183.

-
101. Planck early results. VII. The Early Release Compact Source Catalogue / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // *Astronomy & Astrophysics*. 2011. Vol. 536. P. A7.
 102. Measuring the integrated Sachs-Wolfe effect / F.-X. Dupé, A. Rassat, J.-L. Starck et al. // *Astronomy & Astrophysics*. 2011. Vol. 534. P. A51.
 103. The 200° Long Magellanic Stream System / D. L. Nidever, S. R. Majewski, W. Butler Burton et al. // *The Astrophysical Journal*. 2010. Vol. 723. P. 1618–1631.
 104. A Catalog of 1.4 GHz Radio Sources from the FIRST Survey / R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand et al. // *ApJ*. 1997. Vol. 475. P. 479.
 105. Verkhodanov O. V., Keshelava T. V., Naiden Y. V. On two low harmonics of CMB correlation maps // *Astrophysical Bulletin*. 2012. Vol. 67. P. 245–252.
 106. Correlation properties of the maps of the NVSS survey and WMAP ILC / O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, E. K. Majorova et al. // *Astrophysical Bulletin*. 2008. Vol. 63. P. 366–373.
 107. Risbo T. Fourier transform summation of Legendre series and D-functions // *Journal of Geodesy*. 1996. Vol. 70. P. 383–396.
 108. Naiden Y. V., Verkhodanov O. V. Determination of microwave background map inhomogeneity from angular power spectrum // *Astrophysical Bulletin*. 2011. Vol. 66. P. 345–354.
 109. Verkhodanov O. V., Khabibullina M. L. Dominant multipoles in WMAP5 mosaic data correlation maps // *Astrophysical Bulletin*. 2010. Vol. 65. P. 390–399.
 110. Sachs R. K., Wolfe A. M. Perturbations of a Cosmological Model and Angular Variations of the Microwave Background // *ApJ*. 1967. Vol. 147. P. 73.

111. Zeldovich Y. B., Sunyaev R. A. The Interaction of Matter and Radiation in a Hot-Model Universe // *Ap&SS*. 1969. Vol. 4. P. 301–316.
112. Sunyaev R. A., Zeldovich Y. B. Small scale entropy and adiabatic density perturbations – Antimatter in the Universe // *Ap&SS*. 1970. Vol. 9. P. 368–382.
113. Lewis A. Lensed CMB simulation and parameter estimation // *Phys. Rev. D*. 2005. Vol. 71, no. 8. P. 083008.
114. Giant radio galaxies: problems of understanding and problems for CMB? / O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, M. Singh et al. // *Problems of Practical Cosmology*, Volume 2. 2008. P. 247–450.
115. Radio spectra of giant radio galaxies from RATAN-600 data / M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh et al. // *Astronomy Reports*. 2010. Vol. 54. P. 571–577.
116. A study of giant radio galaxies at RATAN-600 / M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh et al. // *Astrophysical Bulletin*. 2011. Vol. 66. P. 171–182.
117. Solovyov D. I., Verkhodanov O. V. A search for faint giant radio galaxies in the NVSS survey // *Astrophysical Bulletin*. 2011. Vol. 66. P. 416–423.
118. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros et al. // *ApJS*. 2009. Vol. 182. P. 543–558.
119. Naiden Y. V., Verkhodanov O. V. Correlation properties of the WMAP CMB and 2MRS and SDSS catalogs at different redshifts // *Astrophysical Bulletin*. 2013. Vol. 68. P. 471–480.
120. *Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release* / R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. V. Dyk et al. 2002. URL: <http://www.ipac.caltech.edu/2mass>.

-
121. Team M. 2MASS Second Incremental Data Release Catalogs and Tables. 2002.
 122. The 2MASS Redshift Survey—Description and Data Release / J. P. Huchra, L. M. Macri, K. L. Masters et al. // *ApJS*. 2012. Vol. 199. P. 26.
 123. Testing homogeneity on large scales in the Sloan Digital Sky Survey Data Release One / J. Yadav, S. Bharadwaj, B. Pandey et al. // *MNRAS*. 2005. Vol. 364. P. 601–606.
 124. The scale of homogeneity of the galaxy distribution in SDSS DR6 / P. Sarkar, J. Yadav, B. Pandey et al. // *MNRAS*. 2009. Vol. 399. P. L128–L131.
 125. Sylos Labini F., Baryshev Y. V. Testing the Copernican and Cosmological Principles in the local universe with galaxy surveys // *J. Cosmology Astropart. Phys.*. 2010. Vol. 6. P. 21.
 126. Statistics of extreme objects in the Juropa Hubble Volume simulation / W. A. Watson, I. T. Iliev, J. M. Diego et al. // *MNRAS*. 2014. Vol. 437. P. 3776–3786.
 127. Database of Extended Radiation Maps and Its Access System / O. V. Verkhodanov, Y. V. Naiden, V. N. Chernenkov et al. // *Astrophysical Bulletin*. 2014. Vol. 69. P. 113–120.
 128. Bennett C. L., Larson D., Weiland J. L. Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases // *ApJS*. 2013. Vol. 208. P. 54.
 129. The ROSAT all-sky survey bright source catalogue / W. Voges, B. Aschenbach, T. Boller et al. // *A&A*. 1999. Vol. 349. P. 389–405.
 130. HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere / K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday et al. // *ApJ*. 2005. Vol. 622. P. 759–771.

-
131. The CATS Database to Operate with Astrophysical Catalogs / O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach et al. // *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI* / Ed. by G. Hunt, H. Payne. Vol. 125 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. 1997. P. 322.
 132. CATS – The Largest Radio Astronomical Database: Extragalactic Facilities / O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, V. N. Chernenkov et al. // *Baltic Astronomy*. 2000. Vol. 9. P. 604–607.
 133. Current status of the CATS database. / O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach et al. // *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*. 2005. Vol. 58. P. 118–129.
 134. The CATS Service: An Astrophysical Research Tool / O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach et al. // *Data Science Journal*. 2009. Vol. 8. P. 34–40.
 135. The software system “Evolution of radio galaxies” / O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova et al. // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 2000. Vol. 19. P. 662.
 136. Creation of a database of spectral energy distributions of radio galaxies. / O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova et al. // *Baltic Astronomy*. 2000. Vol. 9. P. 668–669.
 137. Найден Я. В. Пакет программ на языке Python для моделирования и анализа данных космического микроволнового фона. 2013. URL: <https://pypi.python.org/pypi/glespy>.
 138. Wells D. C., Greisen E. W., Harten R. H. FITS - a Flexible Image Transport System // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. 1981. Vol. 44. P. 363.
 139. RATAN-600 new zenith field survey and CMB problems / Y. N. Parijskij, N. N. Bursov, A. B. Berlin et al. // *Gravitation and Cosmology*. 2005. Vol. 11. P. 139–144.

140. Definition of the Flexible Image Transport System (FITS) / R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen et al. // *Astropart. Phys.* 2001. Vol. 376. P. 359–380.